

ΗΡΑΚΛΕΙΟ 2014

Τ.Ε.Ι ΚΡΗΤΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΣΤΕΦ

ΤΜΗΜΑ: ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ

ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε.



## ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΠΥΛΩΝΩΝ ΠΑΡΑΚΤΙΩΝ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ

ΕΙΣΗΓΗΤΗΣ: ΚΟΝΤΑΞΑΚΗΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ  
ΣΠΟΥΔΑΣΤΗΣ :ΜΑΛΛΑΞΙΑΝΑΚΗΣ ΑΝΤΩΝΗΣ

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον εισηγητή καθηγητή Κονταξάκη Κωνσταντίνο για την καθοδήγηση του στην εργασία και την οικογένεια μου για την στήριξη τους στην προσπάθεια μου.

## ΣΚΟΠΟΣ

Σκοπός είναι η διερεύνηση της τεχνολογίας των παράκτιων ανεμογεννητριών και συγκεκριμένα για τους πυλώνες των ανεμογεννητριών. Αν εξετάσουμε το αιολικό δυναμικό στις παράκτιες περιοχές της Ευρώπης, που φαίνεται στην εικόνα 29 στη σελίδα 31, παρατηρούμε αμέσως τις τεράστιες δυνατότητες ανάπτυξης παράκτιων ανεμογεννητριών.

Παρατηρούμε επίσης την πλεονεκτική θέση της χώρας μας που εμφανίζεται να διαθέτει στο Αιγαίο πέλαγος μια από τις πλουσιότερες, σε αιολικό δυναμικό, περιοχές της Ευρώπης. Για το λόγο αυτό εκτιμάται ότι η ανάπτυξη αιολικών πάρκων στη χώρα μας τα επόμενα χρόνια θα είναι μεγάλη και στα πλαίσια μιας τέτοιας ανάπτυξης η παρούσα πτυχιακή εργασία επιχειρεί να εξετάσει την τεχνολογία των πυλώνων των παράκτιων ανεμογεννητριών.

Στην παρούσα πτυχιακή γίνεται ανάδειξη της τεχνολογίας για τους πυλώνες των παράκτιων ανεμογεννητριών. Ποιοι τύποι πυλώνων χρησιμοποιούνται, πως κατασκευάζεται ένας πυλώνας και πως εγκαθίσταται στη θάλασσα και ποιες θεμελιώσεις χρησιμοποιούνται. Στη συνέχεια με τη βοήθεια του σχεδιαστικού προγράμματος solidworks θα γίνει η σχεδίαση του πυλώνα της ανεμογεννήτριας εγκατεστημένης στη θάλασσα όπου θα εφαρμοστούν τα προβλεπόμενα φορτία.

Στο 1<sup>ο</sup> κεφάλαιο παρουσιάζονται οι τύποι πυλώνων που υπάρχουν και ποιοι από αυτούς χρησιμοποιούνται για τις παράκτιες εγκαταστάσεις. Στο 2<sup>ο</sup> κεφάλαιο γίνεται μία αναφορά στους τύπους των θεμελιώσεων που χρησιμοποιούνται για κάθε παράκτια εγκατάσταση. Στο 3<sup>ο</sup> κεφάλαιο ο τρόπος κατασκευής του πυλώνα και ποια μέσα χρησιμοποιούνται για τη κατασκευή καθώς και το υλικό κατασκευής. Στο 4<sup>ο</sup> κεφάλαιο είναι για την εγκατάσταση των παράκτιων ανεμογεννητριών και ποια είναι η ποιο συμφέρουσα. Στο 5<sup>ο</sup> κεφάλαιο γίνεται μία αναφορά για τις ωκεανογραφικές συνθήκες και αιολικό δυναμικό. Αναφέρονται οι ωκεανογραφικές συνθήκες και οι αιολικοί πόροι καθώς και ο πυθμένας της θάλασσας. Στο 6<sup>ο</sup> κεφάλαιο παρουσιάζονται τα φορτία που ασκούνται σε μία παράκτια ανεμογεννήτρια. Στο 7<sup>ο</sup> κεφάλαιο αναφέρονται τα γεωμετρικά στοιχεία του πυλώνα και τα τεχνικά χαρακτηριστικά της ανεμογεννήτριας που χρησιμοποιήθηκαν και στη συνέχεια είναι ο σχεδιασμός του πυλώνα και της βάσης του. Στο 8<sup>ο</sup> κεφάλαιο γίνεται προσομοίωση ενός παράκτιου πυλώνα με μονοριλή θεμελίωση όπου σχεδιάστηκε και έγινε ο έλεγχος αντοχής σύμφωνα με τα φορτία που αναφέρονται στο κεφάλαιο 6 στο πρόγραμμα solidworks για ακραίες καιρικές συνθήκες που επικρατούν στις παράκτιες ανεμογεννήτριες. Στο τέλος στο 9<sup>ο</sup> κεφάλαιο είναι τα συμπεράσματα.

## PURPOSE

The aim is to investigate the technology of coastal wind turbines specifically for the pillars of wind turbines. If you look at the wind potential in coastal areas of Europe , as shown in Figure 29 on page 30 , we see immediately the enormous growth potential of coastal wind turbines. We also note the advantage of our country that appears to have the Aegean Sea one of the richest in wind potential areas of Europe . For this reason it is estimated that the development of wind farms in our country in the coming years will be great and within such a development , the present study attempts to examine technology pillars of coastal wind turbines.

This thesis is showcasing the technology pillar of coastal wind turbines. What types of pillars used , how to build a pillar and that is installed in the sea and what foundations are used . Then with the help of design software solidworks design will become the pillar of the wind turbine installed at sea where you will apply the provisions loads.

In the first chapter, the types of pillars are and which ones are used for coastal installations. In the second chapter is a report on the types of foundations used for any offshore facility . In the third chapter the design of the pillar and what instruments are used for the construction and construction material . The 4th chapter is to install coastal wind turbines and what is the most advantage . In the fifth chapter is a report on oceanographic conditions and wind power potential. Refer to oceanographic conditions and wind power resources and the sea floor . In the sixth chapter, the loads exerted in an offshore wind turbine . In the seventh chapter the geometric elements of the pylon and the technical characteristics of wind turbine used, then the design is the pillar and base to. The 8th chapter simulation of a coastal pillar monopile foundation which is designed and was tested for strength in accordance with loads specified in Chapter 6 in the program solidworks for extreme weather conditions in the coastal wind . At the end of the 9th chapter is the conclusions .

## Περιεχόμενα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Ο ΠΥΛΩΝΑΣ ΤΗΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ .....	6
1.1. Τύποι πυλώνων .....	6
1.2. Δικτυωτός πυλώνας .....	7
1.3. Υβριδικός πυλώνας σκυροδέματος/χάλυβα (concrete/steel hybrid tower).....	7
1.4. Σωληνοειδής χαλύβδινος πυλώνας (tubular steel tower).....	8
1.5. Απαιτήσεις σχεδιασμού πυλώνα ανεμογεννήτριας.....	8
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΤΥΠΟΙ ΠΑΡΑΚΤΙΩΝ ΘΕΜΕΛΙΩΣΕΩΝ .....	10
2.1. Monopile .....	10
2.2. Gravitation .....	11
2.3. Suction bucket .....	12
2.4. Tripod .....	13
2.5. Jacket structure .....	14
2.6. Sparc floating .....	15
2.7. Tension leg platform .....	16
2.8. Spar buoy floater .....	16
2.9. TLP-SPAR floater .....	17
2.10. Tri-floater.....	17
2.11. Windwave float.....	18
2.12. Poseidon .....	18
2.13. Windsea .....	19
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΠΥΛΩΝΑ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ .....	19
3.1. Πως ενώνονται τα μέρη του πυλώνα.....	19
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΚΑΙ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ.....	23
4.1. “Bunny Ear” με ολόκληρο το πυλώνα (BE1T) .....	23
4.2. “Bunny Ear” Ο πυλώνας σε δύο κομμάτια (BE2T).....	23
4.3. Προ συναρμολογημένος ρότορας (R2T).....	24
4.4. Πέντε κομμάτια ξεχωριστά (SP5).....	24
4.5. Έξι χωριστά κομμάτια (SP6) .....	25
4.6. Σύγκριση μεθόδων.....	26
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΩΚΕΑΝΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΚΑΙ ΑΙΟΛΙΚΟ ΔΥΝΑΜΙΚΟ .....	31
5.1. Βάθος υδάτων.....	31
5.2. Αιολικό Δυναμικό.....	31
5.3. Πυθμένας της θάλασσας.....	33

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΦΟΡΤΙΑ ΠΟΥ ΕΝΕΡΓΟΥΝ ΣΤΗΝ ΠΑΡΑΚΤΙΑ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑ.....	34
6.1. Μάζα ρότορα-νασέλας .....	34
6.2. Η δύναμη της ώσης πάνω στο ρότορα.....	35
6.3. Η δύναμη της οπισθέλκουσας .....	37
6.4. Η ροπή του ρότορα.....	38
6.5. Υδροδυναμικά φορτία .....	40
6.6. Τα φορτία που ασκούνται πάνω στο πυλώνα συνοπτικά.....	41
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ ΕΛΕΓΧΟΥ ΑΝΤΟΧΗΣ ΤΟΥ ΠΥΛΩΝΑ ΜΕ ΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ SOLIDWORKS .....	42
7.1. Εισαγωγή.....	42
7.2. Σχεδίαση του πυλώνα με τη μονοριπλή βάση στο πρόγραμμα solidworks.....	45
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΦΟΡΤΙΩΝ ΓΙΑ ΤΟΝ ΕΛΕΓΧΟ ΑΝΤΟΧΗΣ ΤΟΥ ΠΥΛΩΝΑ ΣΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ SOLIDWORKS ΚΑΙ ΤΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ .....	51
8.1. Περιπτώσεις φόρτισης (Load cases) .....	51
8.2. Συνοριακές συνθήκες- στηρίξεις. ....	54
8.3. Εφαρμογή των φορτίων. ....	55
8.4. Παράμετροι διακριτοποίησης .....	58
8.5. Υπολογισμός αντοχής του πυλώνα της ανεμογεννήτριας και αποτελέσματα .....	59
1 <sup>η</sup> ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΦΟΡΤΙΣΗΣ 1.1 Η ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑ ΣΕ ΚΑΝΟΝΙΚΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ .....	62
2 <sup>η</sup> ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΦΟΡΤΙΣΗΣ 1.4 Η ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑ ΣΕ ΚΑΝΟΝΙΚΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ .....	65
3 <sup>η</sup> ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΦΟΡΤΙΣΗΣ 1.5 Η ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑ ΣΕ ΚΑΝΟΝΙΚΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ .....	68
4 <sup>η</sup> ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΦΟΡΤΙΣΗΣ 1.6 Η ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑ ΣΕ ΚΑΝΟΝΙΚΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ .....	71
5 <sup>η</sup> ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΦΟΡΤΙΣΗΣ 2.1 Η ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑ ΠΑΡΑΓΕΙ ΗΛΕΚΤΡΙΣΜΟ ΚΑΙ ΕΜΦΑΝΙΖΕΙ ΒΛΑΒΗ.....	74
6 <sup>η</sup> ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΦΟΡΤΙΣΗΣ 2.3 Η ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑ ΠΑΡΑΓΕΙ ΗΛΕΚΤΡΙΣΜΟ ΚΑΙ ΕΜΦΑΝΙΖΕΙ ΒΛΑΒΗ.....	77
7 <sup>η</sup> ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΦΟΡΤΙΣΗΣ 6.1 Η ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑ ΕΙΝΑΙ ΕΚΤΟΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ .....	80
8 <sup>η</sup> ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΦΟΡΤΙΣΗΣ 7.1 Η ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑ ΕΙΝΑΙ ΕΚΤΟΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΚΑΙ ΠΑΡΟΥΣΙΑΖΕΤΑΙ ΒΛΑΒΗ. ....	83
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9: Συμπεράσματα .....	86
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	88

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Ο ΠΥΛΩΝΑΣ ΤΗΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ

Ο πυλώνας είναι ένα σημαντικό στοιχείο στη δομή της ανεμογεννήτριας, όχι μόνο για δομικούς λόγους (μεταφέρουν τα φορτία από τη νασέλα στα θεμέλια), αλλά και για οικονομικούς λόγους: όσο υψηλότερος είναι ο πυλώνας, τόσο μεγαλύτερο το ποσό της ενέργειας που παράγεται. Είναι το ενδιάμεσο μέσο όπου συγκρατεί την νασέλα με τον ρότορα με τέτοιο τρόπο ώστε η ανεμογεννήτρια να έχει μία ασφαλή λειτουργία που εξαρτάται από τη σταθερότητα του πυλώνα και την αντοχή του ώστε να αντέξει το βάρος της νασέλας και του ρότορα αλλά και των φορτίων που δημιουργούνται από τον άνεμο. Επίσης πρέπει να είναι ικανός αντέξει στις καιρικές συνθήκες που επικρατούν στη περιοχή όπου είναι εγκατεστημένη η ανεμογεννήτρια.

### 1.1. Τύποι πυλώνων

Ο πυλώνας μπορεί να κατασκευαστεί από διάφορα υλικά και με διαφορετικούς σχεδιασμούς. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται είναι ο χάλυβας και το οπλισμένο σκυρόδεμα, τις περισσότερες φορές προεντεταμένο, καθώς και συνδυασμός αυτών των δύο. Συνθετικά υλικά κατασκευής όπως το fiber glass βρίσκονται ακόμα σε ερευνητικό επίπεδο. Όσον αφορά τον σχεδιασμό έχουν ακολουθηθεί διαφορετικές έννοιες κατά καιρούς όπως μονοπολική διάταξη σωλήνα (tubular tower), δικτυωτός πυλώνας (lattice tower), με τριποδική διάταξη σωλήνων (three-legged tower) και μονοπολική διάταξη με αντιστήριξη καλωδίων (guy-wired pole tower). [2]



Tubular steel tower

Tubular concrete

Lattice tower

Three-legged tower

Guy-wired tower

**Εικόνα 1: Διαφορετικοί σχεδιασμοί πυλώνων ανεμογεννήτριας**

Έχουν επικρατήσει τρεις διαφορετικοί δομικοί σχεδιασμοί, οι οποίοι έχουν κατασκευαστεί σε μεγάλη κλίμακα ανά τον κόσμο και παρατίθενται παρακάτω :

## **1.2. Δικτυωτός πυλώνας**

Οι δικτυωτοί πυλώνες χρησιμοποιήθηκαν πολύ κατά το παρελθόν, όπου οι ανεμογεννήτριες ήταν πιο μικρές σε μέγεθος (λιγότερο από 1 MW), αλλά χρησιμοποιούνται πλέον σπάνια. Το μεγαλύτερο τους μειονέκτημα είναι το κακό οπτικά και αισθητικά αντίκτυπο, καθώς επίσης και μεγαλύτερο κατασκευαστικό κόστος στο εργοτάξιο και κόστος συντήρησης. Αντίθετα είναι σαφές ότι είναι ελαφρύτερες από οποιαδήποτε άλλη διάταξη σχεδιασμού, χρησιμοποιώντας λιγότερο υλικό, περίπου ίσο με 50% του υλικού ενός μονοπολικού σωληνοειδούς πυλώνα. Επίσης δημιουργούν λιγότερες αναταράξεις αέρα καθώς είναι διαπερατές.

Η φυσική σημασία αυτής της εξοικονόμησης υλικού οφείλεται στα μεγάλα πλάτη των κάτω τμημάτων. Η ανάγκη του υλικού να παραλάβει ένταση είναι αντιστρόφως ανάλογη προς το πλάτος. Με μια σωληνοειδής λεπτότοιχη κατασκευή, υπάρχει ο κίνδυνος λυγισμού, κάτι το οποίο περιορίζει τη μέγιστη διάμετρο. Ένα σχέδιο δικτυώματος δεν λυγίζει σαν ένα κέλυφος. Ο κίνδυνος λυγισμού των επιμέρους μελών περιορίζεται με εισαγωγή πολλών δοκών που δίνουν στο δικτυωτό πυλώνα την χαρακτηριστική εμφάνιση του. [2]

## **1.3. Υβριδικός πυλώνας σκυροδέματος/χάλυβα (concrete/steel hybrid tower).**

Η ιδέα πίσω από τη δημιουργία ενός υβριδικού πυλώνα σκυροδέματος χάλυβα είναι η χρήση σκυροδέματος για το ευρύ κάτω μέρος και χάλυβα στο άνω μέρος του πυλώνα. Στο άνω μέρος σχεδιάζεται ένας συμβατικός χαλύβδινος σωληνοειδής πυλώνας χωρίς να υπάρχει κίνδυνος σύγκρουσης με τους περιορισμούς μεταφοράς, καθώς θα έχει μικρότερο ύψος και συμπερασματικά μικρότερη διάμετρο βάσης. Επίσης καθιστά ευκολότερο το σχεδιασμό του μέρους του σκυροδέματος ώστε να πάρει τις ιδιοσυχνότητες που θέλουμε. Βέβαια υπάρχει ένα επιπλέον κόστος που πρέπει να συμπεριληφθεί που αφορά την σύνδεση του μέρους του σκυροδέματος με το μέρος του χαλύβδινου πυλώνα.

Μία άλλη εφαρμογή των υβριδικών πυλώνων σκυροδέματος/χάλυβα είναι σε περιοχές όπου το κόστος του χάλυβα είναι πολύ ψηλό. Επιπλέον η ευκολότερη μεταφορά λόγω μικρότερων διαστάσεων των τμημάτων του πυλώνα μειώνει το συνολικό κόστος. Από την άλλη μεριά το μεγαλύτερο πρόβλημα είναι το αυξημένο βάρος. [1]



Εικόνα 2:Υβριδικός πυλώνας σκυροδέματος/χάλυβα

#### **1.4. Σωληνοειδής χαλύβδινος πυλώνας (tubular steel tower).**

Ο σωληνοειδής πυλώνας είναι ο τύπος του πυλώνα που έχει επικρατήσει και κατασκευάζεται ευρέως. Το υλικό κατασκευής του είναι ο χάλυβας. Συνήθως έχουν κωνικό σχήμα, διαιρούμενοι σε 3 ή 4 τμήματα τα οποία συναρμολογούνται στο αιολικό πάρκο (συνήθως με προεντεταμένους κοχλίες). Το μήκος ενός τμήματος μπορεί να ποικίλει από 20 έως 30 μέτρα. Κατασκευάζονται κυρίως από ελάσματα φύλλων χάλυβα κομμένα, επεξεργασμένα και συγκολλημένα μεταξύ τους. Το μεγάλο τους πλεονέκτημα είναι ότι προσομοιάζονται με απλό στατικό σύστημα προβόλου, καθώς και ο πολύ εύκολος υπολογισμός των διατομών και των ιδιοτήτων αυτών. [1]

#### **1.5. Απαιτήσεις σχεδιασμού πυλώνα ανεμογεννήτριας.**

Προκειμένου να εξασφαλιστεί ένας ικανοποιητικός σχεδιασμός του πυλώνα της ανεμογεννήτριας πρέπει να ικανοποιηθούν ορισμένες απαιτήσεις ως προς τις διαστάσεις, την πλαστική ροπή αντοχής, τον λυγισμό, της μετατόπισης της κορυφής του πυλώνα, τις φλάντζες συνδέσεως και των συγκολλησεων.

- Στην οριακή κατάσταση αστοχίας ελέγχονται οι μέγιστες ισοδύναμες τάσεις κατά von Mises σε κάθε σημείο του πυλώνα και συγκρίνονται με το όριο θραύσης του χάλυβα.
- Λυγισμός. Ελέγχονται οι επιτρεπόμενες τάσεις στην οριακή κατάσταση λυγισμού σε κάθε σημείο του πυλώνα.
- Μετατόπιση της κορυφής του πυλώνα. Η μέγιστη επιτρεπόμενη μετατόπιση της κορυφής του πυλώνα τίθεται 1,00% του ύψους του πυλώνα έτσι ώστε να αποφευχθεί υπερβολική κίνηση που θα παρεμπόδιζε την ομαλή λειτουργία της ανεμογεννήτριας.

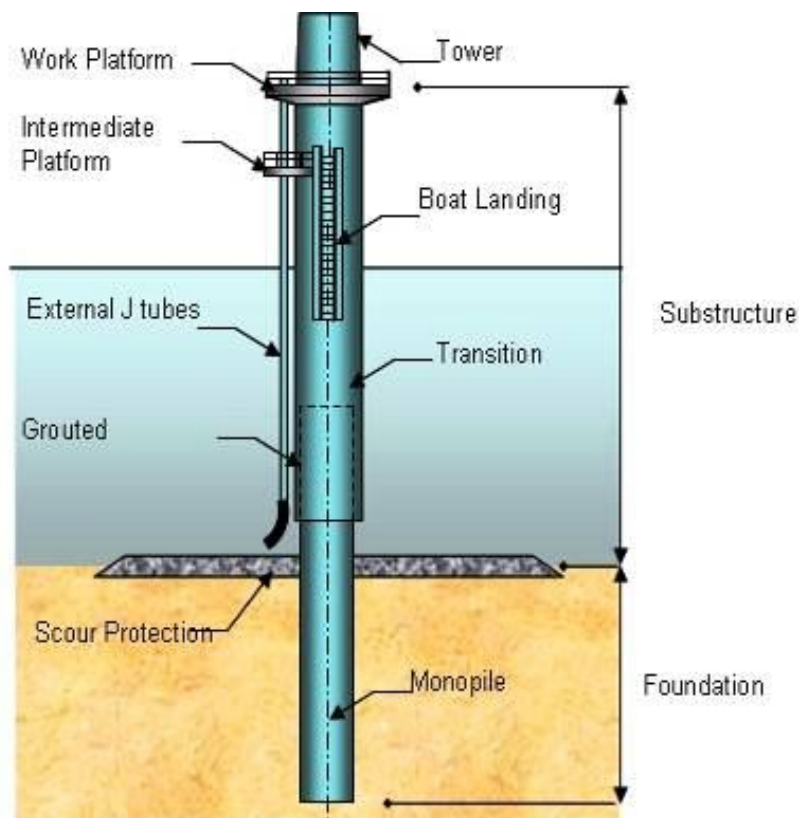


- Κυκλικές Φλάντζες Συνδέσεως. Η σύνδεση των τμημάτων του πυλώνα γίνεται μέσω κυκλικών φλαντζών μαζί με υψηλά προεντεταμένους κοχλίες (HV) και ελέγχεται η σύνδεση αυτή στην οριακή κατάσταση αστοχίας. Επίσης οι προεντεταμένοι κοχλίες οφείλουν να ελεγχθούν και σε κόπωση.
- Συγκολλήσεις. Ελέγχονται οι επιτρεπόμενες τάσεις στην οριακή κατάσταση αστοχίας σε κάθε σημείο κατά ύψος του πυλώνα όπου υπάρχει σύνδεση με συγκόλληση. [2]

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΤΥΠΟΙ ΠΑΡΑΚΤΙΩΝ ΘΕΜΕΛΙΩΣΕΩΝ

Οι θεμελιώσεις των παράκτιων ανεμογεννητριών είναι ένα αρκετά σημαντικό μέρος της ανεμογεννήτριας διότι πρέπει να είναι έτσι σχεδιασμένη η θεμελίωση ώστε να μπορεί να αντέξει τα φορτία της ανεμογεννήτρια που δέχεται από τον άνεμο, να είναι ικανή ώστε να αντέξει το βάρος όλων των μερών της ανεμογεννήτριας και να είναι μια ασφαλής δομή στήριξης για την ανεμογεννήτρια. Υπάρχουν διάφοροι τύποι παράκτιων θεμελιώσεων που είναι έτσι σχεδιασμένοι ώστε να ικανοποιούν τις ανάγκες που υπάρχουν σε κάθε παράκτια εγκατάσταση.

### 2.1. Monopile

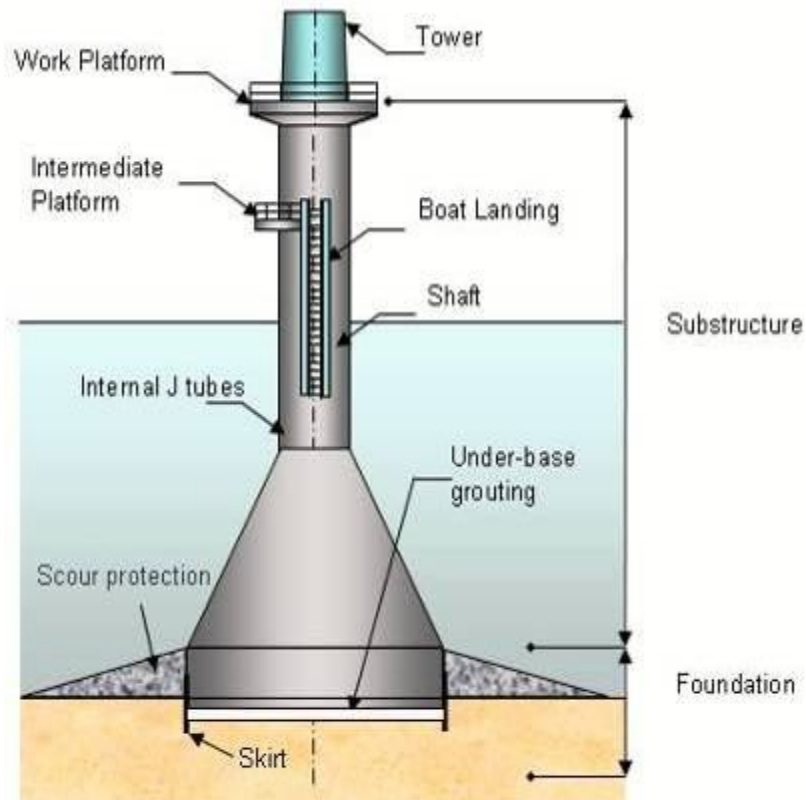


Εικόνα 3:Θεμέλιο τύπου monopile

Η θεμελίωση τύπου monopile αποτελείται από ένα χαλύβδινο σωλήνα που έχουν εφαρμοστεί πάνω του κάποια επιπλέον στοιχεία για την εύκολη συναρμολόγηση και συντήρηση της γεννήτριας και εξασφαλίζουν την σταθερότητα των θεμελίων. Αυτά είναι :

- Σύστημα προστασίας βυθού ώστε να μην γίνεται μεταφορά της άμμου στο βυθό της θάλασσας .
- Ο πυλώνας ο οποίος βυθίζεται στον βυθό της θάλασσας και σταθεροποιεί την ανεμογεννήτρια .
- Τις εξωτερικές σωλήνες (external J tubes) για την προστασία των καλωδίων του ρεύματος από το θαλάσσιο περιβάλλον και να εξασφαλίζουν την ασφαλή σύνδεση με το δίκτυο μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας.
- Την ενδιάμεση πλατφόρμα (intermediate platform) για να συνδέει την σκάλα αποβίβασης (boat landing) με την πλατφόρμα εργασίας (work platform)
- Ο πυλώνας (tower) που στηρίζει την ανεμογεννήτρια. Η διάμετρος και το πάχος του πυλώνα υπολογίζεται από το βάθος που τοποθετείται, τη μάζα της γεννήτριας, το ύψος του πυλώνα, τα φορτία που ασκούνται πάνω του από τα ρεύματα που υπάρχουν κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας και τα κύματα που επικρατούν στην περιοχή τοποθέτησης του. Τοποθετείται στο βυθό με δονήσεις ή σε διάτρητους βράχους. [3]

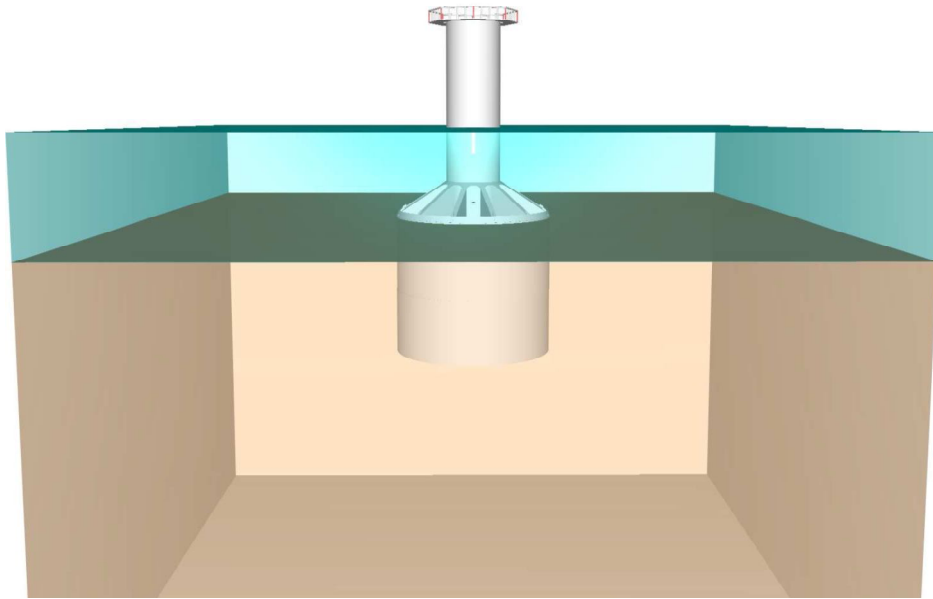
## 2.2. Gravitation



Εικόνα 4: Θεμέλιο τύπου Gravitation

Το θεμέλιο είναι χαλύβδινο, κωνικό και τοποθετείται στον βυθό της θάλασσας όπου γεμίζεται με σκυρόδεμα, το οποίο προσθέτει στο θεμέλιο επιπλέον βάρος για να αντέξει την δύναμη από τα κύματα και την πίεση. Έχει αντιδιαβρωτική προστασία με την μέθοδο της βαφής. Χρησιμοποιεί τη μάζα του για να αντέξει στα φορτία που τον καταπονούν για να παραμείνει σε όρθια θέση. [3]

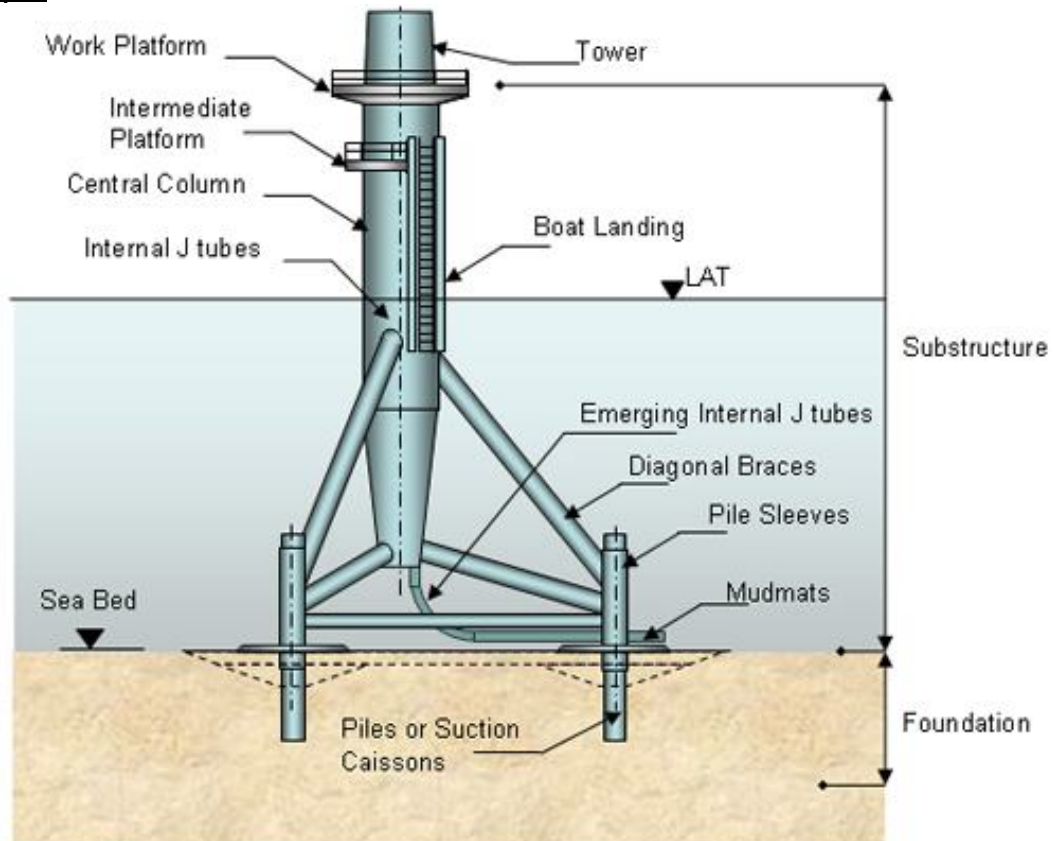
### **2.3. Suction bucket**



**Εικόνα 5: Θεμέλιο τύπου Suction bucket**

Η τύπου Suction bucket ή suction caissons θεμελίωση είναι μια διάταξη κατασκευασμένη από χάλυβα. Δεν απαιτεί εξοπλισμό για την τοποθέτηση των πασσάλων στο βυθό αλλά μια αντλία για την αφαίρεση του νερού. Αποτελείται από ένα πυλώνα ο οποίος στηρίζεται σε μια εσωτερικά κενή βάση με μεγάλη διάμετρο, ανοικτή στο κάτω μέρος και κλειστή στην κορυφή. Εγκαθίσταται αρχικά στο βυθό με το ίδιο το βάρος του. Είναι κενό από μέσα έτσι ώστε μετά την τοποθέτηση του να αντλείται το νερό που βρίσκεται ενδιάμεσα στο βυθό και την βάση. Αναπτύσσεται έτσι διαφορετική πίεση εσωτερικά και εξωτερικά του θεμελίου, με αποτέλεσμα να ασκούνται στο θεμέλιο οι δυνάμεις που είναι απαραίτητες για να σταθεροποιηθεί στο βυθό. [3]

## 2.4. Tripod



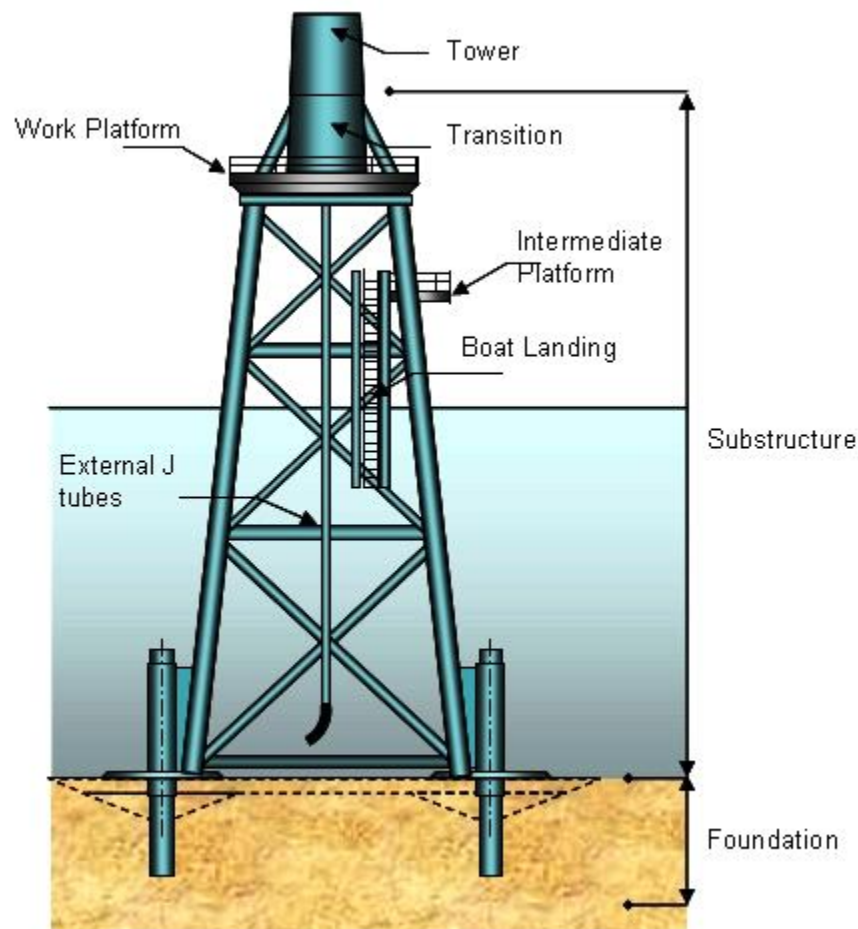
Εικόνα 6: Θεμέλιο τύπου Tripod

Η θεμελίωση τύπου tripod αποτελείται από:

- Πλατφόρμα εργασίας (work platform),
- Ενδιάμεση πλατφόρμα (intermediate platform),
- Κεντρικό πυλώνα (central column) για να στηριχθούν σε αυτόν τα πόδια
- Εσωτερικές σωλήνες (internal j tubes) από τις οποίους περνάνε τα ρευματοφόρα καλώδια,
- Πυλώνας (tower),
- Σκάλα αποβίβασης (boat landing),
- Αναδυόμενες εσωτερικές σωλήνες (emerging internal j tubes) οι οποίες περικλείουν τα ρευματοφόρα καλώδια για αποφυγή βραχυκυκλώματος, διαγώνια στηρίγματα (diagonal braces) έτσι ώστε να παρέχουν μεγαλύτερη σταθερότητα και αντοχή στην βάση της ανεμογεννήτριας,
- Σωλήνες για τους πασσάλους (pile sleeves), από όπου περνάνε οι πάσσαλοι για να τοποθετηθούν στο βυθό και να σταθεροποιήσουν την βάση μαζί με την γεννήτρια,
- Κάλυμμα (mudmats) για την αποφυγή της μετακίνησης του βυθού,
- Πάσσαλοι (piles or suction caisson) για την σταθεροποίηση του θεμελίου στο βυθό.

Τα πλεονεκτήματα αυτού του τύπου θεμελίωσης είναι ότι χρησιμοποιείται για μεγαλύτερα βάθη (25 έως 40 μέτρα νερού) και ότι οι δυνάμεις στην βάση μοιράζονται και στα τρία πόδια. [3]

## 2.5. Jacket structure



Εικόνα 7: Θεμέλιο τύπου jacket structure

Η θεμελίωση τύπου jacket structure αποτελείται από:

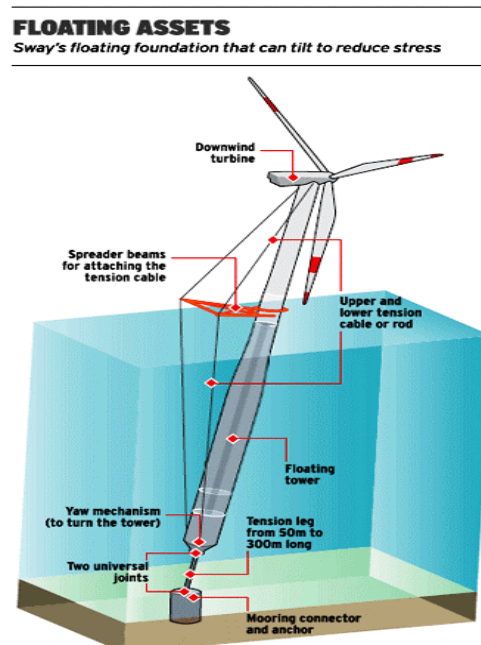
- Πλατφόρμα εργασίας (work platform),
- εξωτερικές σωλήνες (external J tubes)
- σκάλα αποβίβασης (boat landing),
- ενδιάμεση πλατφόρμα (intermediate platform) και τον μεταβατικό πυλώνα (transition) όπου συνδέει τον πυλώνα συγκράτησης της ανεμογεννήτριας με την βάση,
- διαγώνια στηρίγματα (diagonal braces),
- κάλυμμα (mudmats) για την αποφυγή της μετακίνησης του βυθού,
- πάσσαλοι (piles of suction caisson).

Μπορεί να τοποθετηθεί σε μεγαλύτερο βάθος νερού (15 έως 80 μέτρα νερού). [3]

## 2.6. Sparc floating

Η θεμελίωση τύπου sparc floating. Αποτελείται από:

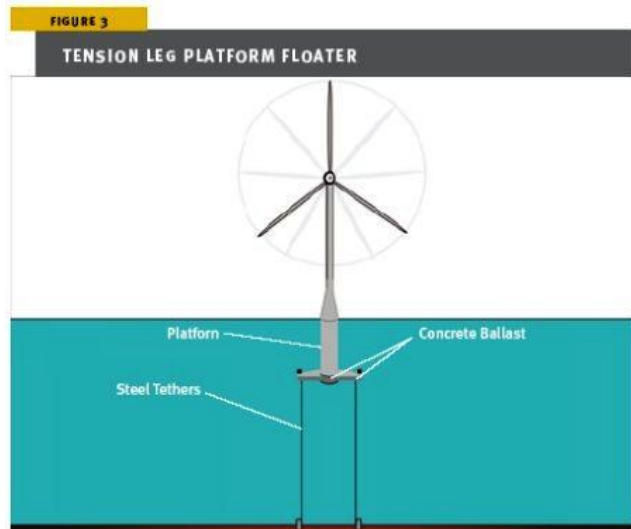
- Διάταξη στήριξης των συρματόσκοινων που στηρίζουν τον πυλώνα σε αρθρωμένη βάση.
- Μηχανισμό προσανεμισμού του πυλώνα (yaw mechanism), για να μπορεί να περιστρέφει τον πυλώνα ανάλογα με την φορά του ανέμου.
- Δυο σφαιρικές αρθρώσεις συνδεδεμένες μεταξύ τους με μία δοκό προκειμένου να στηριχθεί ο πυλώνας στην άγκυρα.
- Συρματόσχοινα στήριξης του πυλώνα (πάνω και κάτω συρματόσχοινα από τη διάταξης στήριξης)
- Πλωτός πυλώνας.
- Αμφιαρθρωμένος δοκός έντασης (tension leg from 50 to 300m long). Το μήκος του εξαρτάται από το βάθος της θάλασσας δηλαδή το βάθος που έχει τοποθετηθεί η άγκυρα του πυλώνα. Ο αμφιαρθρωμένος δοκός έχει μήκος από 50 μέτρα έως 300 μέτρα
- Σύστημα έρματος και αγκύρωσης πυλώνα με το βυθό (mooring connector and anchor). Είναι για να σταθεροποιεί τον πυλώνα με την ανεμογεννήτρια στο σημείο που έγινε η θεμελίωση.



Εικόνα 8: Θεμέλιο τύπου sparc floating

Το σύστημα αυτό θεμελίωσης μπορεί να μετατοπίζεται ελαφρά ώστε να μειώνει την καταπόνηση του πυλώνα. [3]

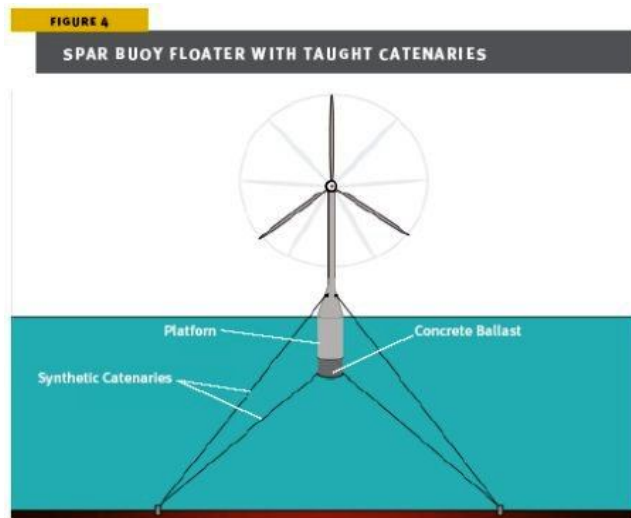
## 2.7. Tension leg platform



Εικόνα 9: Θεμελίωση τύπου tension leg platform

Η θεμελίωση τύπου tension leg platform είναι μια πλωτή κοίλη βάση όπου πάνω της τοποθετείται ο πυλώνας με τη ανεμογεννήτρια. Για να παραμείνει σταθερή στο σημείο τοποθέτησης της η πλατφόρμα, προενταμένα συρματόσχοινα συνδέουν την βάση της με άγκυρες στον πυθμένα της θάλασσας. Στον πυθμένα τα συρματόσχοινα σταθεροποιούνται με άγκυρες βαρύτητας από μπετόν ή μεταλλικά στοιχεία. [3]

## 2.8. Spar buoy floater

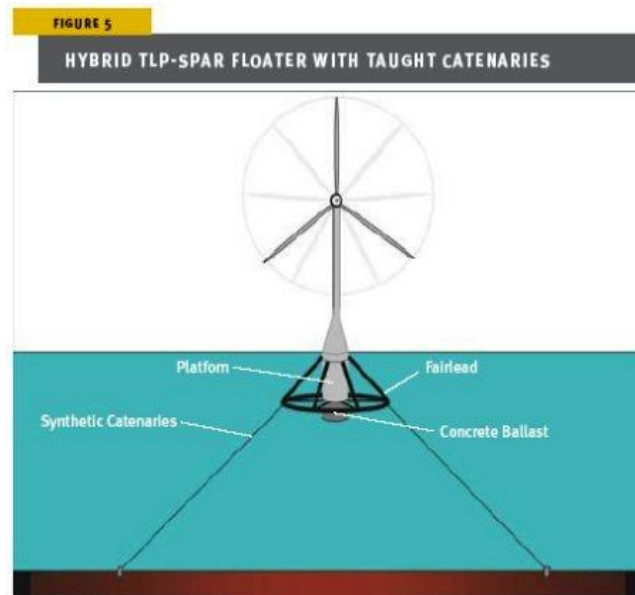


Εικόνα 10: Θεμελίωση τύπου spar buoy floater

Η θεμελίωση τύπου spar buoy floater αποτελείται από ένα κυλινδρικό κοίλο πυλώνα σημαντικά μεγαλύτερο σε διάμετρο από τον πυλώνα που στηρίζει την ανεμογεννήτρια, έτσι ώστε να δημιουργούνται οι κατάλληλες δυνάμεις της άνωσης και να παραμένει στη επιφάνεια η ανεμογεννήτρια. Βρίσκεται κάτω από την επιφάνεια του νερού. Θεμελιώνεται στον πυθμένα με συρματόσχοινα τα οποία είναι από χάλυβα ή άλλο συνθετικό υλικό και τα οποία σταθεροποιούνται στον βυθό της θάλασσας με άγκυρες. Αυτός ο τύπος θεμελίωσης μπορεί να υποστεί κλίση μερικών μοιρών από τις δυνάμεις που ασκούνται από τα κύματα και την δύναμη του αέρα, η οποία κλίση μπορεί να περιοριστεί με την διαμόρφωση των συρματόσχοινων. [3]



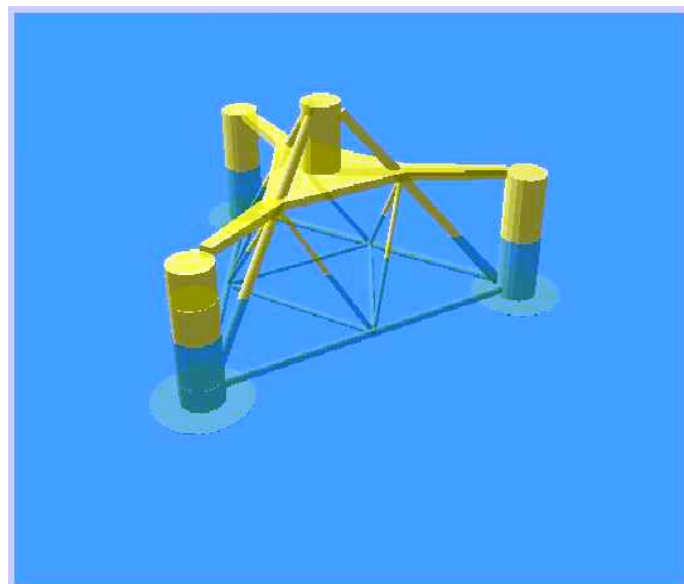
## 2.9. TLP-SPAR floater



Εικόνα 11: Θεμελίωση τύπου hybrid TLP-SPAR floater

Η θεμελίωση τύπου hybrid TLP-SPAR floater είναι ένας συνδυασμός από τους τύπους θεμελίωσης tension leg platform και spar buoy floater . Αποτελείται από έναν κύλινδρο ο οποίος επιπλέει και σε αυτόν έχουν προσδεθεί πάνω του πλωτοί κύλινδροι (βαρελάκια) για να εμποδίζουν την ανεμογεννήτρια να υφίσταται μεγάλες κλίσεις από τα κύματα με αποτέλεσμα να μειώνουν τον κίνδυνο να βυθιστεί. [3]

## 2.10. Tri-floater



Εικόνα 12: Θεμελίωση τύπου tri-floater

Η θεμελίωση τύπου tri-floater αποτελείται από τρεις κοίλους κυλίνδρους που δημιουργούν συνθήκες άνωσης για να παραμένει η διάταξη στην επιφάνεια της θάλασσας . Οι κύλινδροι συνδέονται μεταξύ τους με χαλύβδινους δοκούς. Για να παραμείνει στο σημείο στο οποίο έχει τοποθετηθεί και να αποφεύγονται οι μεγάλες μετακινήσεις έχει στερεοποιηθεί στο βυθό με συρματόσχοινα που είναι δεμένα (στο βυθό). [3]

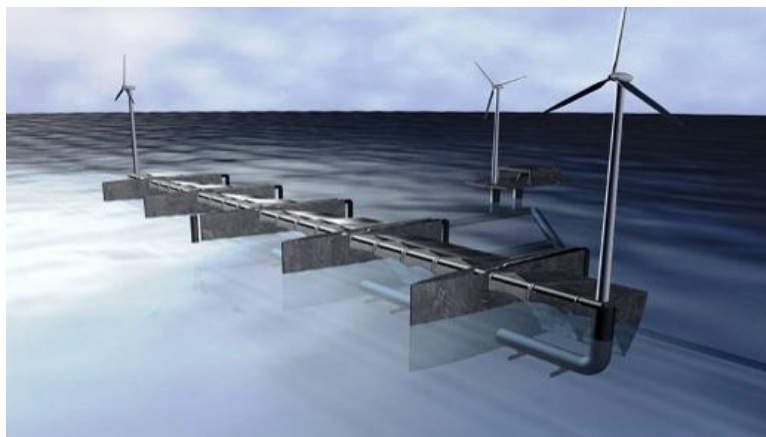
## 2.11. Windwave float



Εικόνα 13: Θεμελίωση τύπου windwave float

Η θεμελίωση τύπου windwave float είναι μια πλωτή εξέδρα με τρεις κυλίνδρους που συνδέονται μεταξύ τους με σιδερένιους σωλήνες (gangways) οι οποίοι επιτρέπουν στο νερό της θάλασσα να περνάει από τον ένα κύλινδρο στον άλλο. Είναι βυθισμένο μέχρι την μέση στην θάλασσα. Με αυτόν τον τρόπο το θεμέλιο είναι πάντα σε όρθια θέση καθώς γίνεται αντιστάθμιση στα έρμα. Η ανεμογεννήτρια είναι τοποθετημένη πάνω στον ένα κύλινδρο. Ο συγκεκριμένος τύπος θεμελίου έχει και μια άλλη ιδιαιτερότητα που είναι ότι η γεννήτρια μπορεί να γυρίσει και να είναι πάντα κάθετη στην διεύθυνση του ανέμου. Από τον βυθό δένεται με 6 αλυσοειδή σύρματα από τα όποια τα τέσσερα είναι για τον κύλινδρο που έχει τοποθετηθεί η ανεμογεννήτρια. Μια άλλη καινοτομία που προσφέρει ο συγκεκριμένος τύπος θεμελίωσης είναι ότι κατά την αντιστάθμιση που γίνεται για να παραμείνει σε ορθή θέση η ανεμογεννήτρια χρησιμοποιεί και την ενέργεια των κυμάτων και την μετατρέπει σε ηλεκτρική. Με αυτόν τον τρόπο ο συγκεκριμένος τύπος θεμελίωσης δεν είναι μόνο για την στήριξη της ανεμογεννήτριας αλλά μπορεί να παράγει και ισχύ. [3]

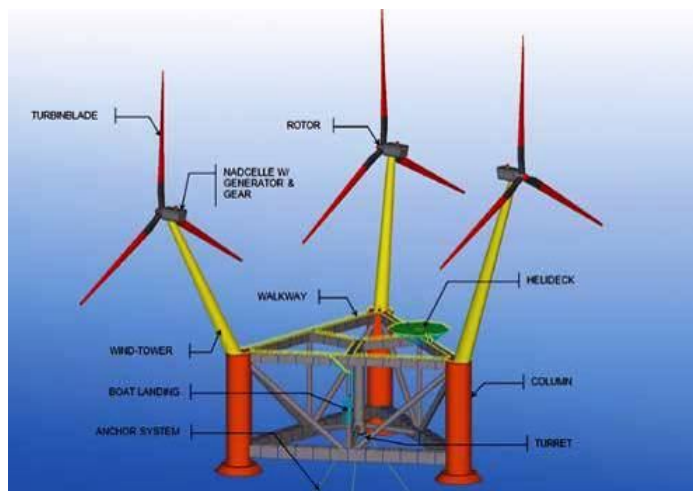
## 2.12. Poseidon



Εικόνα 14: Θεμελίωση τύπου Poseidon

Η θεμελίωση τύπου Poseidon έχει και αυτή ενεργό ρολό στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας καθώς και αυτή εκμεταλλεύεται την ενέργεια των κυμάτων και την μετατρέπει σε ηλεκτρική. Ένα άλλο πλεονέκτημα του συγκεκριμένου θεμελίου είναι ότι μπορούν πάνω του να τοποθετηθούν μέχρι και τρεις γεννήτριες. Μπορεί να θεμελιωθεί σε βάθος νερού μεγαλύτερο από τα 30 μέτρα. Για να παραμείνει στο σημείο τοποθέτησης δένεται από τον βυθό με συρματόσκοινα. [3]

## 2.13. Windsea



Εικόνα 15: Θεμελίωση τύπου windsea

Η θεμελίωση τύπου windsea αποτελείται από τρία κυλινδρικά τμήματα τα οποία είναι συνδεδεμένα μεταξύ τους με χαλύβδινους σωλήνες έτσι ώστε να αντέχουν τις τάσεις που αναπτύσσονται από τις γεννήτριες και το θαλάσσιο περιβάλλον. Είναι και αυτός ο τύπος θεμελίωσης πλωτός. Έχει σχεδιαστεί για βάθος νερού από 40 μέτρα και άνω, σε αντίθεση με τους υπόλοιπους τύπους πλωτών ανεμογεννητριών που απαιτείται συνήθως βάθος νερού τουλάχιστον 110 μέτρα.

Από τον βυθό συγκρατείται με 6 συρματόσκοινα. Έχει σχεδιαστεί έτσι ώστε να μπορεί να περιστρέφεται και οι γεννήτριες να έρχονται πάντα σε κάθετη θέση στην ροή του ανέμου. Αυτό που διαφοροποιεί τον συγκεκριμένο τύπο θεμελίωσης από τους υπολοίπους τρόπους θεμελίωσης είναι ότι μπορούν πάνω του να τοποθετηθούν τρεις γεννήτριες. [3]

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΠΥΛΩΝΑ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ

Ο πυλώνας μιας ΑΓ υποστηρίζει το σύστημα της ατράκτου(νασέλα και ρότορα) το οποίο ζυγίζει αρκετούς τόνους και ανυψώνει την ανεμογεννήτρια σε ύψος όπου η ταχύτητα του ανέμου είναι αρκετά μεγαλύτερη και λιγότερο διαταραγμένη σε σχέση με το έδαφος. Το ύψος του πυλώνα έχει να κάνει με την ανάγκη ο δρομέας να βρίσκεται μέσα σε ένα καλό προφίλ ανέμου, αλλά ταυτόχρονα θα πρέπει και ο πυλώνας να μπορεί να αντέξει την αύξηση της ροπής στη βάση του. Συνήθως ο πυλώνας είναι μεταλλικός σωληνωτός ή δικτυωτός. Για τις παράκτιες ανεμογεννήτριες είναι κατασκευασμένος από χάλυβα για να αντέξει τις συνθήκες που επικρατούν στην επιφάνεια της θάλασσας.

### 3.1. Πως ενώνονται τα μέρη του πυλώνα

Η κατασκευή του πυλώνα στις παράκτιες ανεμογεννήτριες περιλαμβάνει μια σειρά συγκολλήσεων και διαδικασίες, οι οποίες εξαρτώνται από το ύψος του πυλώνα, το σχεδιασμό και την τοποθεσία.

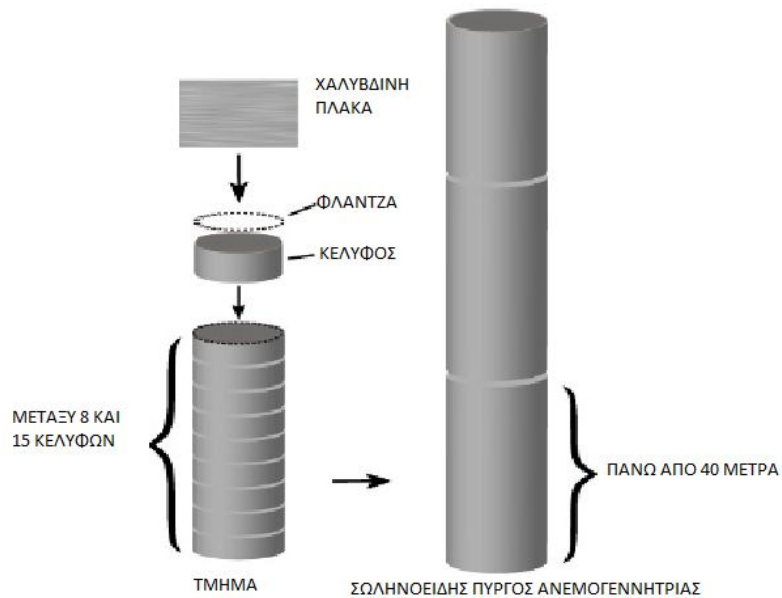
Ωστόσο, οι δύο διαδικασίες συγκόλλησης που χρησιμοποιούνται πιο συχνά στην κατασκευή σημερινών σωληνοειδών πυλώνων των ανεμογεννητριών, είναι η Arc Welding (SAW), χρησιμοποιείται για να κάνει όλες τις ραφές συγκόλλησης

για τη κατασκευή, και Flux Cored Arc Welding (FCAW), η οποία χρησιμοποιείται για τα πλαίσια των θυρών και εσωτερικών διαρρυθμίσεων. Εκτιμάτε ότι περισσότερο από το 90 % των συγκολλήσεων για σωληνωτούς πυλώνες γίνεται με Arc Welding (SAW) . [4]



Εικόνα 16:Ο πυλώνας της ανεμογεννήτριας

Παρακάτω φαίνεται πως οι παράκτιοι πυλώνες συγκολλούνται και συναρμολογούνται.



Εικόνα 17:Ορολογία και η διάταξη των στοιχείων του πυλώνα.

Ένας πυλώνας αποτελείται από μερικά τμήματα χάλυβα, χαρακτηριστικά από 2 έως 4, στα οποία κατά την ένωση τους παρεμβάλλεται η φλάντζα όπου βιδώνονται μαζί. Κάθε τμήμα κατασκευάζεται από διάφορα μεμονωμένα κυλινδρικά κομμάτια που ονομάζονται κελύφη τα οποία είναι κατασκευασμένα από χάλυβα, τα οποία ενώνονται μεταξύ τους με συγκόλληση η οποία γίνεται από ρομπότ. Κάθε τμήμα ολοκληρώνεται με δύο φλάντζες όπου είναι τοποθετημένες στο άκρο των περιβλημάτων με συγκόλληση Arc Welding (SAW). [4]

## ΧΑΛΥΒΑΣ

Τα ελάσματα φύλλων από χάλυβα που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή των πυλώνων ανεμογεννητριών ποικίλουν σε πάχος 12 έως 75 χιλιοστά ανάλογα με το σχεδιασμό τους. Όσο μεγαλύτερη είναι η διάμετρος, τόσο λεπτότερο είναι το υλικό που απαιτείται για τον πυλώνα.

Ο τύπος S355 χάλυβας ( Ευρωπαϊκού τύπου) χρησιμοποιείται ευρέως για των πυλώνων των ανεμογεννητριών, λόγω της υψηλής αντοχής του. [4]



Εικόνα 18: δημιουργία του κελύφους. Πρώτον : Οι πλάκες κουρμπάρονται . Στη συνέχεια: Εξωτερικά και εσωτερικά διαμήκης ηλεκτροσυγκολλούνται δια της μεθόδου του arc welding

## Συναρμολόγηση των τμημάτων

Η συναρμολόγηση των τμημάτων γίνεται με δύο μεθόδους, η μία μέθοδος είναι η head and tail stock positioned και η δεύτερη με τη μέθοδο του κροκόδειλου.

### Μέθοδος head and tail stock positioned

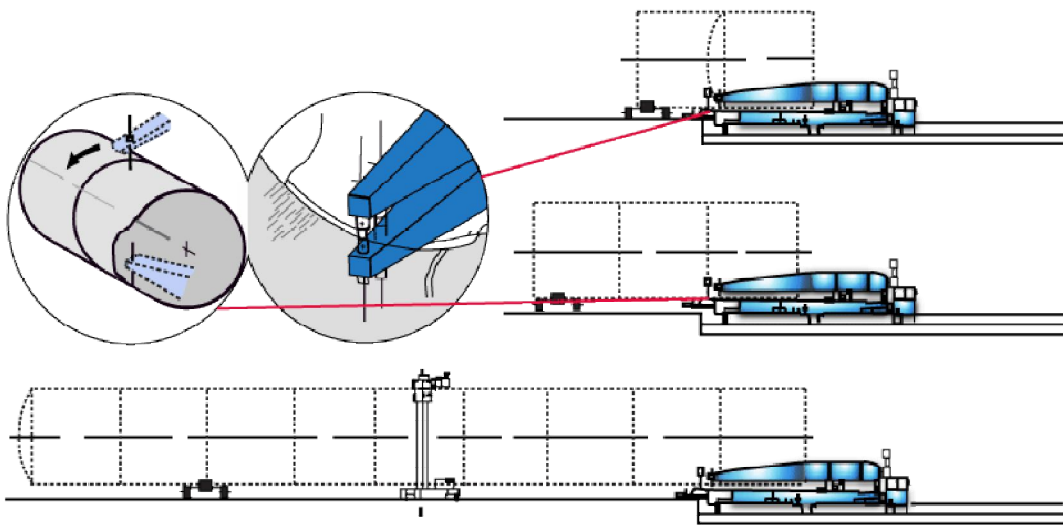
1. Στο ένα τμήμα τοποθετείται το κέλυφος με τη φλάντζα (εξωτερικά) και στο άλλο τμήμα το κέλυφος χωρίς τη φλάντζα.
2. Τα δύο τμήματα συμπιέζουν τα κελύφη και τα συγκρατούν. Γίνεται η πρώτη συγκόλληση πονταρίσματος και στη συνέχεια εσωτερικά και εξωτερικά γίνεται περιφερειακά η συγκόλληση με τη διαδικασία arc welding
3. Όταν τα πρώτα 2 κελύφη ενωθούν, ένα τρίτο κέλυφος τοποθετείται και γίνεται η ίδια διαδικασία. Κατά συνέπεια η διαδικασία συνεχίζεται έως ότου θα φθάσει το τμήμα το πλήρες μήκος περίπου 8 έως 15 κελύφη.



Εικόνα 19: Συναρμολόγηση των τμημάτων με τη μέθοδο Head and tail stock positioned. [4]

### Συναρμολόγηση των τμημάτων με τη μέθοδο κροκόδειλος.

1. Το ένα κέλυφος (με τη φλάντζα) συσφίγγεται με τη μέθοδο του «κροκόδειλου».
2. Πρώτα γίνεται η συγκόλληση για ποντάρισμα, στη συνέχεια η εξωτερική και η εσωτερική επιφάνεια συγκολλούνται περιμετρικά με τη μέθοδο arc welding.



Εικόνα 20: Συναρμολόγηση των τμημάτων με τη μέθοδο του κροκόδειλου.

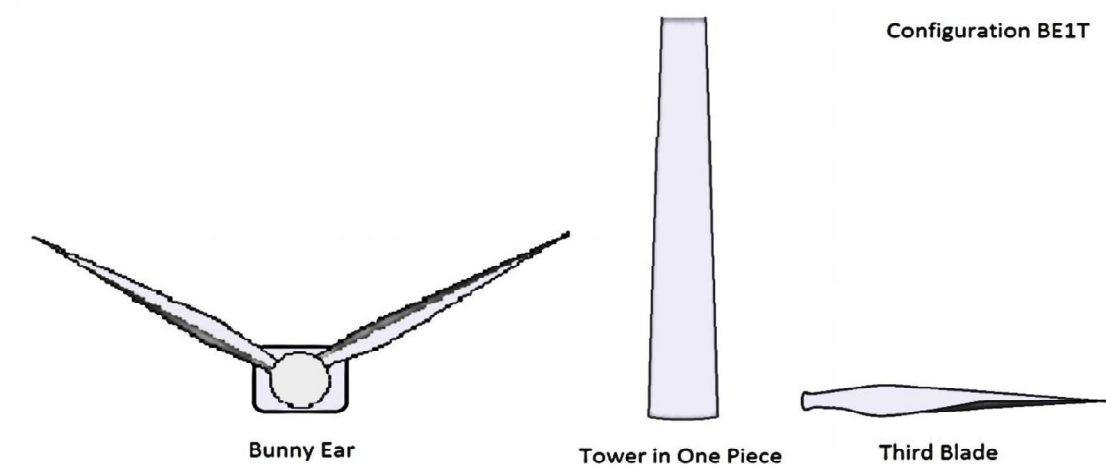
Το πλαίσιο της ανθρωποθυρίδας και η συναρμολόγηση της ενώνονται χειροκίνητα με συγκόλληση flux cored arc welding (FCAW). [4]

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΚΑΙ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ

Οι παράκτιες περιοχές αιολικών πάρκων επιλέγονται με βάση την ύπαρξη ισχυρών ανέμων οι οποίοι όμως περιορίζουν το διαθέσιμο χρόνο για την εγκατάσταση για την ασφαλή λειτουργία των γερανών. Για την επίλυση του προβλήματος των εξωτερικών συνθηκών κατά την εγκατάσταση των ανεμογεννητριών, έχουν προταθεί διάφορες ιδέες και έχουν εφαρμοστεί ώστε να μειωθεί ο χρόνος που καταναλώνεται στις παράκτιες εργασίες. Αυτές οι ιδέες είναι βασισμένες στη μεταφορά των προ συναρμολογημένων τμημάτων στο λιμάνι και στη τοποθέτησή τους στο κατάστρωμα του πλοίου. Έχοντας 6 τμήματα ανά ανεμογεννήτρια δημιουργούνται διάφοροι αριθμοί προ συναρμολογημένων τμημάτων και θεωρώντας ότι ο πυλώνας είναι σε δύο κομμάτια αυτό αυξάνει τα προ συναρμολογημένα τμήματα. Υπάρχουν 5 μέθοδοι που συνήθως εφαρμόζονται στις παράκτιες εγκαταστάσεις αιολικών πάρκων. Οι μέθοδοι είναι: BE1T, BE2T, R2T, SP5 και SP6. [5]

### 4.1. “Bunny Ear” με ολόκληρο το πυλώνα (BE1T)

Η νασέλα, η πλήμνη και οι τα δύο φτερά συναρμολογούνται μαζί στο λιμάνι σε μορφή «bunny ear». Ο πυλώνας συναρμολογείται επίσης στο λιμάνι και το τρίτο φτερό μεταφέρεται ξεχωριστά στο ίδιο πλοίο μαζί με όλα τα υπόλοιπα τμήματα της ανεμογεννήτριας. Επομένως η ανεμογεννήτρια μεταφέρεται σε τρία κομμάτια στη τοποθεσία όπου είναι να εγκατασταθεί. Αυτή η μέθοδος καλείται «bunny ear with tower in one piece» (εν συντομία BE1T) και απαιτούνται τρεις παράκτιες ανελκύσεις στο εργοτάξιο. [5]

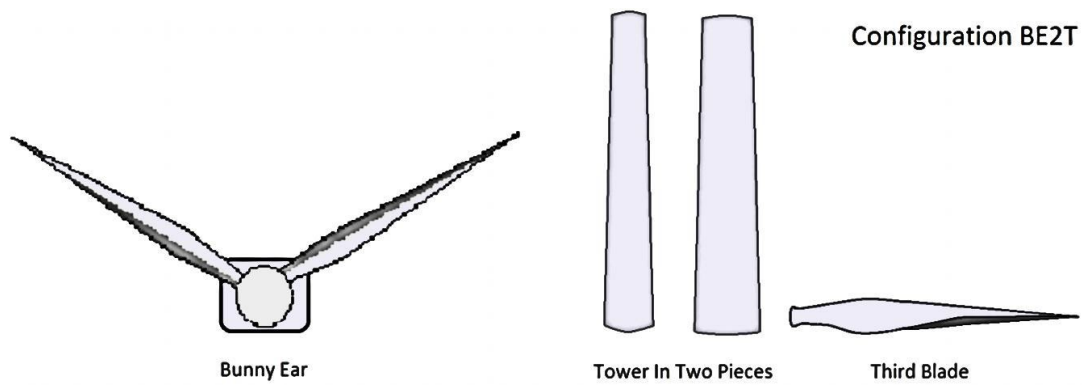


Εικόνα 21: bunny ear with tower in one piece.

### 4.2. “Bunny Ear” Ο πυλώνας σε δύο κομμάτια (BE2T)

Η νασέλα, η πλήμνη και οι τα δύο φτερά συναρμολογούνται μαζί στο λιμάνι σε μορφή όπως είναι το κεφάλι του λαγού για αυτό το λόγο καλείται «bunny ear» στη βιομηχανία. Ο πυλώνας μεταφέρεται σε δύο κομμάτια και το τρίτο φτερό τοποθετείται επίσης ξεχωριστά στο ίδιο πλοίο. Επομένως μία ανεμογεννήτρια μεταφέρεται σε τέσσερα κομμάτια στη περιοχή όπου είναι να γίνει η εγκατάσταση. Αυτή η μέθοδος καλείται «bunny ear with two pieces of tower» (εν συντομία BE2T) και απαιτούνται τέσσερις παράκτιες ανελκύσεις στο εργοτάξιο. [5]

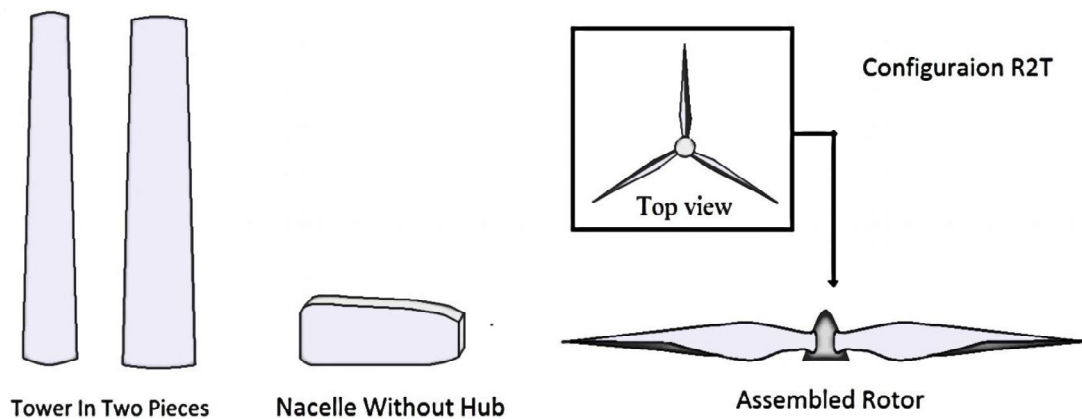




Εικόνα 22: bunny ear with two pieces of tower

### 4.3. Προ συναρμολογημένους ρότορας (R2T)

Η πλήμνη και τα φτερά συγκεντρώνονται στο λιμάνι και συναρμολογούνται ώστε να έχουμε πλήρη τον ρότορα. Ο πυλώνας (σε δύο κομμάτια) και η νασέλα τοποθετούνται στο ίδιο πλοίο. Η ανεμογεννήτρια μεταφέρεται στην τοποθεσία εγκατάστασης σε τέσσερα κομμάτια. Αυτή η μέθοδος ονομάζεται "R2T" και απαιτούνται τέσσερις παράκτιες ανελκύσεις στο εργοτάξιο. [5]

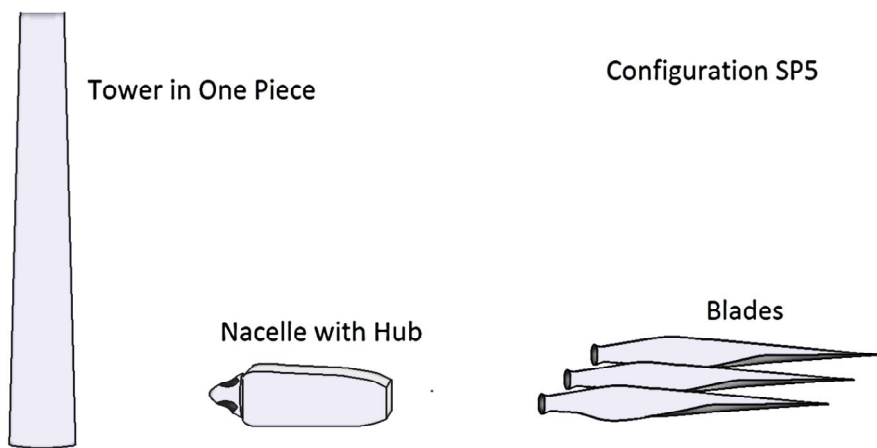


Εικόνα 23:προ συναρμολογημένους ρότορας (R2T).

### 4.4. Πέντε κομμάτια ξεχωριστά (SP5)

Ο πυλώνας συναρμολογείται στο λιμάνι και μεταφέρεται ολόκληρος. Η πλήμνη και η νασέλα συναρμολογούνται επίσης και αυτά στο λιμάνι. Τα φτερά αφήνονται χωριστά και τοποθετούνται το ένα δίπλα στο άλλο. Έτσι η μεταφορά της ανεμογεννήτριας γίνεται σε πέντε κομμάτια. Αυτή η μέθοδος καλείται "χωριστά κομμάτια,5 (separate Pieces,5)"( ενσυντομία SP5) " και απαιτούνται πέντε παράκτιες ανελκύσεις στο εργοτάξιο. [5]

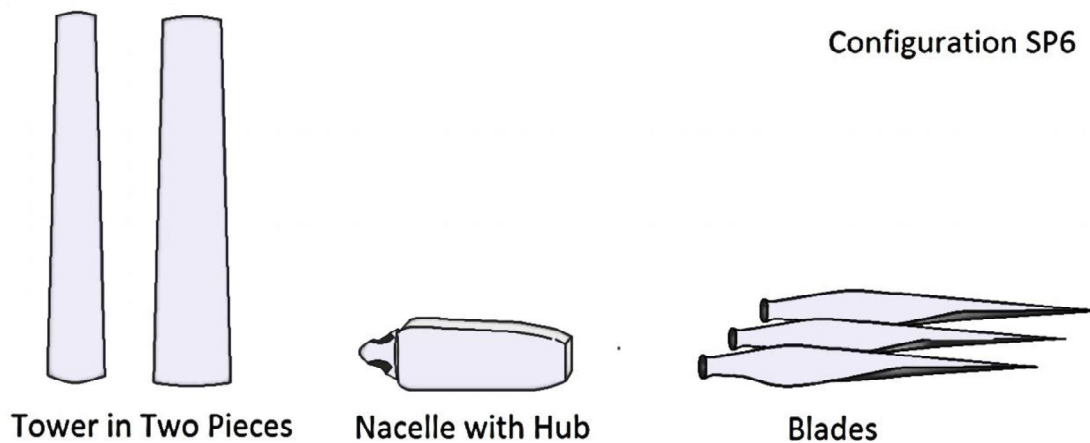




Εικόνα 24: χωριστά κομμάτια,5 (SP5)

#### 4.5. Έξι χωριστά κομμάτια (SP6)

Η πλήμνη και η νασέλα συγκεντρώνονται και συναρμολογούνται στο λιμάνι. Ο πυλώνας μεταφέρεται σε δύο κομμάτια και τα φτερά τοποθετούνται χωριστά το ένα δίπλα στο άλλο. Επομένως η ανεμογεννήτρια μεταφέρεται στη περιοχή εγκατάστασης σε έξι κομμάτια. Αυτή η μέθοδος καλείται "έξι χωριστά κομμάτια" ( εν συντομία SP6) και απαιτούνται έξι παράκτιες ανελκύσεις στο εργοτάξιο. [5]



Εικόνα 25: έξι χωριστά κομμάτια (SP6)

## 4.6. Σύγκριση μεθόδων

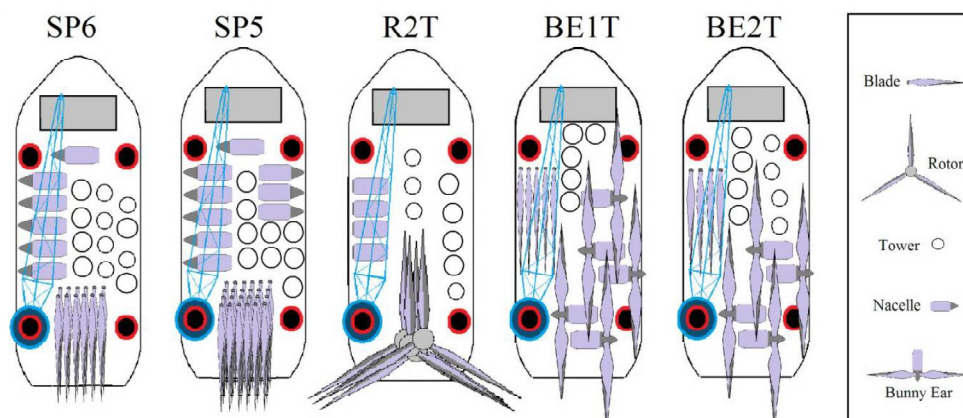
Και οι πέντε μέθοδοι της μεταφοράς των προ συναρμολογημένων κομματιών των ανεμογεννητριών έχουν και θετικές αλλά και αρνητικές επιπτώσεις στο κόστος των εγκαταστάσεων. Ένα βασικό πρόβλημα για τη θαλάσσια μεταφορά των προ συναρμολογημένων κομματιών είναι το ότι απαιτεί καλές καιρικές συνθήκες στη θάλασσα γιατί τα δυναμικά φορτία που δημιουργούνται στα προ συναρμολογημένα κομμάτια της ανεμογεννήτριας κατά τη διάρκεια της μεταφοράς τους μπορεί να είναι πέρα από τις παραμέτρους του σχεδιασμού τους. Αυτό είναι ένας άλλος παράγοντας που κάνει τη ροή του έργου να εξαρτάται από τις συνθήκες της θάλασσας.

Η επιλογή της μεθόδου μεταφοράς του εξοπλισμού στο χώρο εγκατάστασης σχετίζεται με το μέγεθος του υπάρχοντος πλοίου, την απόσταση από το λιμάνι προς την τοποθεσία εγκατάστασης, το μέγεθος των προ συναρμολογημένων κομματιών της ανεμογεννήτριας και την ανυψωτική ικανότητα του γερανού που είναι πάνω στο πλοίο. Διαιρώντας τον διαθέσιμο χώρο του καταστρώματος του πλοίου με τον αριθμό των μεταφερόμενων ανεμογεννητριών που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να προσεγγίσουμε και να καταλάβουμε πόσο χώρο απαιτείται για μία ανεμογεννήτρια στην αντίστοιχη διαμόρφωση. Εάν μία ανεμογεννήτρια των 2 έως 3,6 MW θεωρείται ότι καταλαμβάνει περίπου τον ίδιο χώρο στο κατάστρωμα, και αν οι μεταφορές των ανεμογεννητριών είναι ενιαίες και αγνοούνται οι μεταφορές για τις ανεμογεννήτριες των 5MW, τότε το ποσό των απαιτούμενων τετραγωνικών που καταλαμβάνει μία ανεμογεννήτρια είναι: 510 m<sup>2</sup> για την BE1T, 255-510 m<sup>2</sup> για R2T, 350-355 για SP5 και 450 έως 533 m<sup>2</sup> στην SP6 σε γενικές γραμμές.

Wind Farm	Configuration	Installation Unit	(MW)	# turbines on deck	m <sup>2</sup> /turbine	Weight Capacity Used
Horns Rev 1	<b>BE1T</b>	Sea Energy	2	2	510	18.1%
Horns Rev 1	<b>BE1T</b>	Sea Power	2	2	510	18.1%
Prinses Amalia	<b>BE1T</b>	Sea Energy	2	2	510	18.1%
OWEZ	<b>BE1T</b>	Sea Energy	3	2	510	20.7%
North Hoyle	<b>BE2T</b>	<i>Excalibur</i>	2	1	768	34.2%
Ormonde	<b>R2T</b>	<i>Sealack</i>	5	2	1250	52.5%
Nysted	<b>R2T</b>	Sea Power	2.3	4	255	41.9%
Lillgrund	<b>R2T</b>	Sea Power	2.3	3	340	34.2%
Horns Rev II	<b>R2T</b>	Sea Power	2.3	2	510	22.8%
Belwind 1	<b>SP5</b>	<i>JB 114</i>	3	2	350	39.5%
Rhyl Flats	<b>SP5</b>	<i>Lisa A</i>	3.6	1	1000	26.3%
Thanet	<b>SP5</b>	Resolution	3	9	355.5	24.8%
Greater Gabbard	<b>SP6</b>	Levithan	3.6	2	450	64.6%
Thornton Bank	<b>SP6</b>	<i>Vagant</i>	5	1	400	65.6%
Lynn & Inner Dowsing	<b>SP6</b>	Resolution	3.6	6	533.3	28.2%
Greater Gabbard	<b>SP6</b>	<i>Sealack</i>	3.6	3	833.3	50.4%

Πίνακας 1 : Statistics on “Deck load Configurations” over 14 existing projects Vessels written in Italic.

Το τεχνικό φυλλάδιο για την εγκατάσταση των ανεμογεννητριών στο πλοίο που ονομάζεται «Ειρηνικός Ωκεανό», δείχνει ότι μπορούν να τοποθετηθούν 12 ανεμογεννήτριες στο κατάστρωμα του πλοίου με τη μέθοδο SP5. Λαμβάνοντας υπόψη των διαθέσιμο χώρο του πλοίου ο οποίος είναι 4300 m<sup>2</sup>, ο απαιτούμενος χώρος για κάθε ανεμογεννήτρια καθορίζεται να είναι 358 m<sup>2</sup>. αυτό το εμβαδόν που καλύπτει κάθε ανεμογεννήτρια πλησιάζουν τις τιμές της «Thanet» και «Belwind 1». Ως εκ τούτου, οι τιμές που καθορίζουν τον αναγκαίο χώρο στο κατάστρωμα για τις ανεμογεννήτριες με τη μέθοδο SP5 είναι μέσα στα περιθώρια. [5]



**Εικόνα 26: Διαφορετικές διαμορφώσεις φορτίου καταστρώματος σε WTIV (Σχέδια είναι ενδεικτικά). Τα δεδομένα δίνονται στον Πίνακα 1 (στήλες: m<sup>2</sup>/turbine και ικανότητα βάρους χρησιμοποιείται).**

Όπως φαίνεται στο πίνακα 1, ανεμογεννήτριες των 5 MW παρατηρούνται σε δύο έργα (Thornton και Ormonde) και η διαμόρφωση του καταστρώματος για το φορτίο μεταφοράς είναι διαφορετικό ως εκ τούτου δεν υπάρχουν στατιστικά στοιχεία για την αξιολόγηση μίας μέσης τιμής. Το βάρος και το μέγεθος αυτών των μηχανών είναι διαφορετικό από τις άλλες ανεμογεννήτριες των 2 MW.

Ένας σημαντικός παράγοντας ανάλογα με τα στατιστικά στοιχεία του πίνακα 1 είναι ότι το βάρος των ανεμογεννητριών δεν επηρεάζει την μεταφορά τους. Στο πίνακα 1, το συνολικό βάρος του φορτίου μεταφοράς δεν υπερβαίνει τις δυνατότητες του πλοίου. Το μέγιστο βάρος του μεταφερόμενου φορτίου σε πλοίο είναι 65,6% "Thornton Bank". Η διαμόρφωση του φορτίου στο κατάστρωμα δεν εξαρτάται μόνο από το διαθέσιμο χώρο του καταστρώματος, αλλά εξαρτάται επίσης από την φέρουσα ικανότητα του γερανού SWL ( Safe Working Load) του πλοίου, δεδομένου ότι είναι μία ολοκληρωμένη διαδικασία που ονομάζεται «μεταφορά και εγκατάσταση: T&I». Κάθε μέρος της ανεμογεννήτριας έχει διαφορετικό βάρος, με αποτέλεσμα κάθε προ συναρμολογημένο κομμάτι να έχει διαφορετικό βάρος. Το βαρύτερο κομμάτι καθορίζει την ελάχιστη απαίτηση ικανότητας SWL ως εκ τούτου, δεν είναι όλα τα πλοία κατάλληλα για όλες τις μεθόδους μεταφοράς και εγκατάστασης (T&I). Στο πίνακα 2 φαίνεται η ελάχιστη απαίτηση SWL από το γερανό του πλοίου για την εγκατάσταση και ανύψωση διαφόρων μερών της ανεμογεννήτριας σε διαφορετικές μεθόδους του T&I. Ποιο συχνά η BE1T και BE2T το «bunny ear», R2T « η νασέλα χωρίς τη πλήμνη», η SP5 και η SP6 « η νασέλα με τη πλήμνη μαζί» θεωρούνται τα βαρύτερα κομμάτια για την ανύψωση (στο παρακάτω πίνακα 2 φαίνονται οι εξαιρέσεις). [5]

	BE1T	BE2T	R2T	SP5	SP6
Areva Multibrid M5000	328*	328*	233**	∅295	∅295
REPower 5MW	422*	422*	290**	∅374	∅374
REPower 6MW	448*	448*	316**	∅400	∅400
Siemens 2.3 - 93	132.7*	132.7*	82**	∅130	∅114.3
Siemens 3.6 - 107	201.8*	201.8*	125**	180***	∅167.4
Vestas V90 - 3	128*	128*	70**	∅110	∅110
Vestas V164 - 7	500.5*	500.5*	Not given	Not Given	∅430.5
Vestas V80 - 2	155***	100	69**	155***	∅87

Πίνακας 2: Ελάχιστη απαίτηση για γεράνο SWL OWTs σε διαφορετικές T & I Μέθοδος (τόνοι)

\* Αντιπροσωπεύει το βάρος του " bunny ear"

\*\* Αντιπροσωπεύει το βάρος της «της νασέλας χωρίς πλήμνη»

\*\*\* Αντιπροσωπεύει το βάρος ολόκληρου του πυλώνα (Προ συναρμολογημένος πυλώνας)

∅ Αντιπροσωπεύει τη νασέλα με τη πλήμνη

Για παράδειγμα αν επιλέξουμε την ανεμογεννήτρια Repower 5MW για το υποθετικό πρόγραμμα, η βέλτιστη μέθοδος της T&I θα ήταν η R2T όσο αφορά την ικανότητα ανύψωσης του γερανού που απαιτεί 290 τόνους. Οι περισσότεροι από τους εν πλω γερανούς Wind Turbine Installation Vessel (WTIV) και Jack Up Barges (JUB) έχουν αρκετή παραγωγική ικανότητα SWL, αλλά ακόμα πολλοί από αυτούς δεν είναι κατάλληλοι για την ανύψωση πάνω από 974 τόνους που απαιτείτε για τις ανεμογεννήτριες στην SP5 ή SP6. [5]



Εικόνα 27: Wind Turbine Installation Vessel (WTIV)

Ο εν πλω γερανός WTIV είναι αυτοκινούμενη μονάδα ειδικά σχεδιασμένη σύμφωνα με τις απαιτήσεις της βιομηχανίας. Ο γερανός της μονάδας αυτής έχει μεγάλη ανυψωτική ικανότητα. Η μεταφορική ικανότητά του είναι μεταξύ από 1300 τόνους έως 8000 τόνους και η διαθέσιμη επιφάνεια στο κατάστρωμα είναι 3750 m<sup>2</sup>. Ο εν πλω γερανός WTIV έχει την δυνατότητα να λειτουργήσει σε παράκτια περιοχή με βάθος νερού από 24 m έως 45 m. [5]



**Εικόνα 28: Jack Up Barges (JUB)**

Ο εν πλω γερανός Jack Up Barges (JUB) έχει σχεδιαστεί με σκοπό τις παράκτιες γεωτρήσεις αλλά χρησιμοποιείται και στη παράκτια αιολική βιομηχανία. Έχουν μικρότερη ικανότητα μεταφοράς φορτίου από τους WTIV και δεν είναι αυτοκινούμενη μονάδα, πρέπει να ρυμουλκηθούν στο σημείο της εγκατάστασης. Η μεταφορική ικανότητά του είναι μεταξύ από 900 τόνους έως 2000 τόνους και η διαθέσιμη επιφάνεια στο κατάστρωμα είναι 2500 m<sup>2</sup>. Ο εν πλω γερανός JUB έχει την δυνατότητα να λειτουργήσει σε παράκτια περιοχή με βάθος νερού από 18 m έως 50 m.

Η σύγκριση του χρόνου που χρειάζεται κάθε μέθοδος για την εγκατάσταση μπορεί να γίνει μόνο υπό τις συγκεκριμένες συνθήκες της εγκατάστασης. Κάθε λειτουργία των γερανών στις παράκτιες τοποθεσίες όπου γίνεται η εγκατάσταση χρειάζεται διαφορετικό χρόνο που εξαρτάται από το βάρος των μερών της ανεμογεννήτριας και την ταχύτητα ανύψωσης του γερανού και την εμπειρία του προσωπικού. Στο παρακάτω πίνακα φαίνεται ο χρόνος που χρειάζεται ξεχωριστά για τι κάθε μία μέθοδος T&I. [5]

ΜΕΘΟΔΟΣ	ΑΡΙΘΜΟΣ ΑΝΥΨΩΣΕΩΝ	ΧΡΟΝΟΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ (hr)
BE1T	3	9
BE2T	4	12
R2T	4	12
SP5	5	15
SP6	6	18

**Πίνακας 3: Αξιολόγηση διάρκειας των παράκτιων δραστηριοτήτων του γερανού για κάθε μέθοδο, με την προϋπόθεση ότι κάθε ανύψωση διαρκεί 3 ώρες.**

Από το πίνακα φαίνεται ότι η μέθοδος BE1T συμφέρει περισσότερο από τις υπόλοιπες διότι καταναλώνει λιγότερο χρόνο για κάθε παράκτια εγκατάσταση. Οι ώρες που δίνονται είναι μόνο για τη λειτουργία του γερανού και την συναρμολόγηση, αγνοώντας το μέγεθος της ανεμογεννήτριας, και την απόδοση του γερανού. [5]



## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΩΚΕΑΝΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΚΑΙ ΑΙΟΛΙΚΟ ΔΥΝΑΜΙΚΟ**

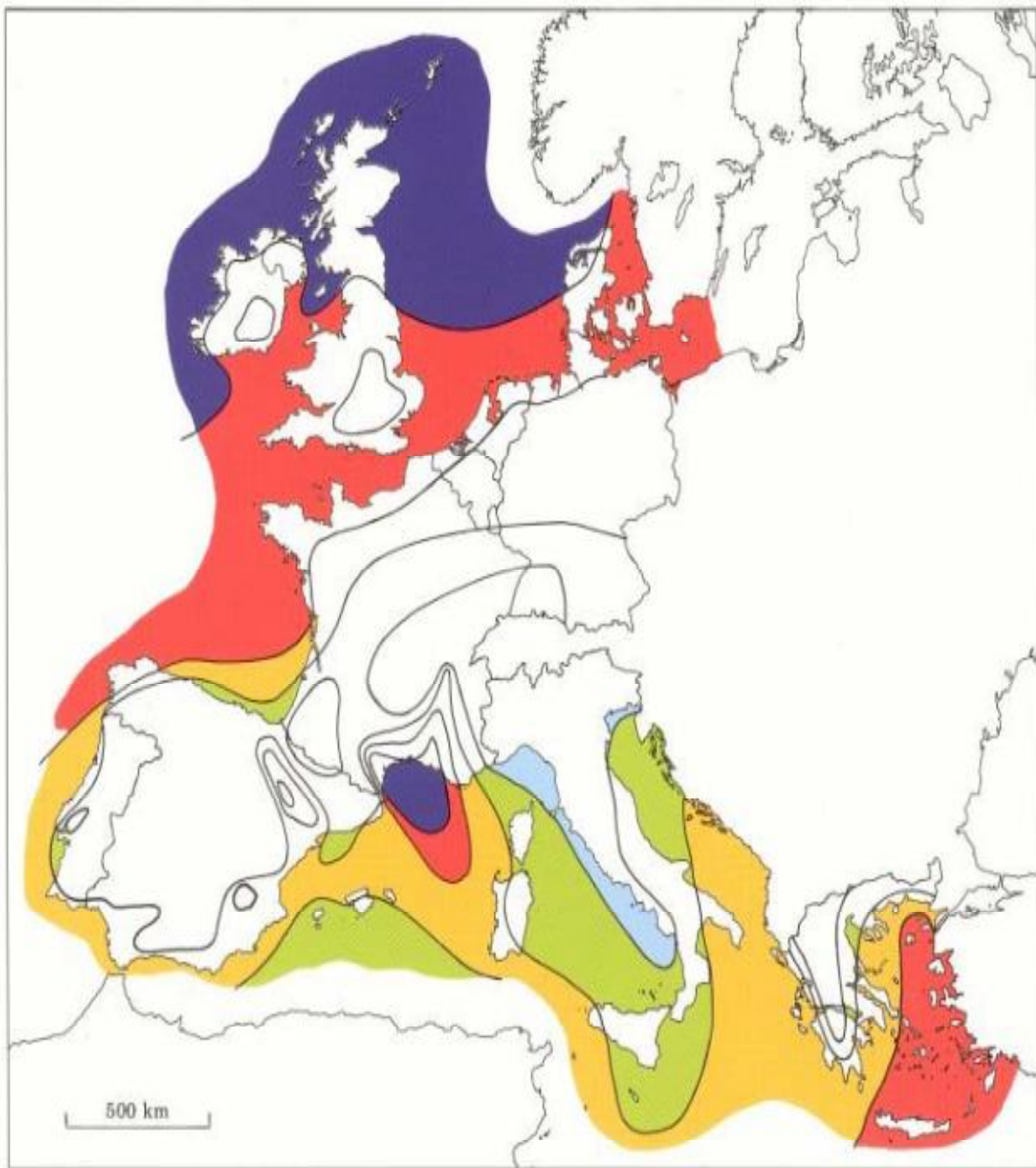
Η χωροθέτηση των παράκτιων ανεμογεννητριών αρχικά προσδιορίζεται από ωκεανογραφικές και μετεωρολογικές συνθήκες. Οι διαδικασίες αδειοδότησης λαμβάνουν υπόψη τα οικολογικά και ανταγωνιστικά οικονομικά συμφέροντα και τελικά υπόκεινται σε άλλους παράγοντες. [6]

### **5.1. Βάθος υδάτων**

Το βάθος των υδάτων είναι η πιο σημαντική ωκεανογραφική παράμετρος. Το παλιρροϊκό εύρος πρέπει επίσης να ληφθεί υπόψη. Ωστόσο είναι πιθανό να υπάρχουν ρηχές ακτές όπου εξαιτίας της λάσπης και για οικολογικούς λόγους δεν μπορούν να ανεγερθούν ανεμογεννήτριες. Για το λόγο αυτό, σε κάποιες περιοχές όπως στη Γερμανία τα μεγάλα έργα μπορούν να εφαρμοστούν μόνο σε μεγάλες αποστάσεις από τη ακτή και σε βάθος του νερού (από 20 έως 40 μέτρα). Η Ελλάδα δε διαθέτει τέτοια αβαθή νερά. Το ύψος των κυμάτων είναι εξίσου σημαντικός παράγοντας με το βάθος του νερού. [6]

### **5.2. Αιολικό Δυναμικό**

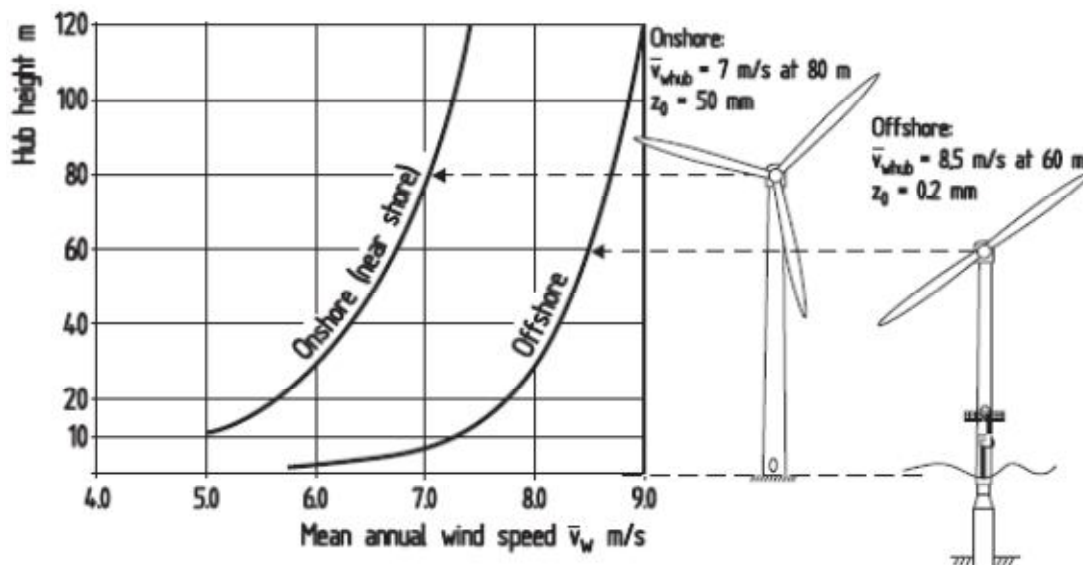
Οι υψηλότερες ταχύτητες ανέμου πάνω από την θάλασσα και ο σχεδόν απεριόριστος διαθέσιμος χώρος είναι ουσιώδη κίνητρα για την παράκτια εγκατάσταση ανεμογεννητριών. Στην εικόνα 29 παρέχει μια επισκόπηση των αιολικών συνθηκών στις ακτές ανά την Ευρώπη. Στην άμεση περιοχή στα ανοικτά των ακτών σε απόσταση περίπου 10 χιλιομέτρων μέσα στη θάλασσα απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή στις συνθήκες του ανέμου. Οι ανεμογεννήτριες πρέπει να τοποθετούνται σε απόσταση τέτοια από την ακτή, ώστε να είναι σε θέση να εκμεταλλευτούν την παράκτια αιολική ενέργεια όσο το δυνατόν αποτελεσματικότερα. Με τον τρόπο αυτό η απόδοση της ενέργειας μπορεί να είναι από 30 έως 40% υψηλότερη σε σύγκριση με το χερσαίο τμήμα. Η κατανομή συχνοτήτων της ταχύτητας του ανέμου μπορεί να περιγραφεί σύμφωνα με την κατανομή Weibull με συντελεστή προσαύξησης του  $k = 2,0 - 2,2$ . Ανάλογα με τη θέση, η επικρατούσα διεύθυνση του ανέμου στην Ευρώπη κυμαίνεται μεταξύ ΝΔ και ΒΔ. Εξαιτίας της μικρής τραχύτητας της επιφάνειας της θάλασσας, η ταχύτητα του ανέμου αυξάνει πιο γρήγορα ανάλογα με το ύψος σε σχέση με τη στεριά. Το κέρδος σε ενεργειακή απόδοση με την αύξηση του ύψους είναι συνεπώς μικρότερο από ότι στη στεριά, αφού τελικά το ύψος της παράκτιας ανεμογεννήτριας είναι πιο χαμηλό (εικόνα 30). [6]



Wind resources over open sea (more than 10 km offshore) for five standard heights										
	10 m		25 m		50 m		100 m		200 m	
	$m s^{-1}$	$Wm^{-2}$	$m s^{-1}$	$Wm^{-2}$	$m s^{-1}$	$Wm^{-2}$	$m s^{-1}$	$Wm^{-2}$	$m s^{-1}$	$Wm^{-2}$
Dark Purple	> 8.0	> 600	> 8.5	> 700	> 9.0	> 800	> 10.0	> 1100	> 11.0	> 1500
Red	7.0-8.0	350-600	7.5-8.5	450-700	8.0-9.0	600-800	8.5-10.0	650-1100	9.5-11.0	900-1500
Yellow	6.0-7.0	250-300	6.5-7.5	300-450	7.0-8.0	400-600	7.5- 8.5	450- 650	8.0- 9.5	600- 900
Light Green	4.5-6.0	100-250	5.0-6.5	150-300	5.5-7.0	200-400	6.0- 7.5	250- 450	6.5- 8.0	300- 600
Light Blue	< 4.5	< 100	< 5.0	< 150	< 5.5	< 200	< 6.0	< 250	< 6.5	< 300

Εικόνα 29 : Ευρωπαϊκός παράκτιος χάρτης αιολικού δυναμικού.





Εικόνα 30: Λογαριθμικό προφίλ της αύξησης της ταχύτητας του ανέμου με το ύψος για ανεμογεννήτρια σε ομαλή στεριά και παράκτια.

Η ένταση της τύρβης είναι μία άλλη σημαντική παράμετρος. Πιο συγκεκριμένα πάνω από το έδαφος η τύρβη έχει ένα εύρος 10 έως 20%, ενώ στην ανοιχτή θάλασσα η τύρβη περιορίζεται σε λιγότερο από 10%. Μία τυπική τιμή είναι γύρω στο 8% σε ύψος 60-70 μέτρων. Ως αποτέλεσμα αυτής της μικρότερης έντασης της τύρβης είναι η μικρότερη επιβάρυνση της ανεμογεννήτριας. [6]

### 5.3. Πυθμένα της θάλασσας

Η φύση του πυθμένα της θάλασσας είναι σημαντική για τη θεμελίωση μιας ανεμογεννήτριας. Η αντοχή του εδάφους διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στις δονήσεις που υπόκειται η ανεμογεννήτρια. Ανάλογα με τη φύση του βυθού, τα ωκεάνια ρεύματα πρέπει να ληφθούν υπόψη γιατί προκαλούν σημαντικές μετατοπίσεις υλικού π.χ. αν ο βυθός αποτελείται από άμμο. Με τον τρόπο αυτό μπορεί να επηρεαστεί η σταθερότητα των θεμελίων. [6]

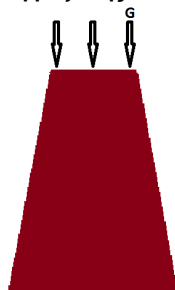
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΦΟΡΤΙΑ ΠΟΥ ΕΝΕΡΓΟΥΝ ΣΤΗΝ ΠΑΡΑΚΤΙΑ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑ

### 6.1. Μάζα ρότορα-νασέλας

Η μάζα τους είναι ιδιαίτερα σημαντική για τη σχεδίαση της δομής στήριξής τους. Όσο αυξάνεται το μέγεθος της ανεμογεννήτριας αυξάνεται και η μάζα της αλλά με τη πρόοδο της τεχνολογίας έχει μειωθεί σημαντικά η αυξητική αυτή τάση. Για μία ανεμογεννήτρια των 5 MW συγκεκριμένα της “Repower” η μάζα της φαίνεται στο παρακάτω πίνακα. [7]

ΟΛΙΚΗ ΜΑΖΑ ΤΗΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ ΤΩΝ 5 MW	
ΤΜΗΜΑΤΑ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ	ΜΑΖΑ (kg)
ΡΟΤΟΡΑΣ	110000
ΝΑΣΕΛΛΑ	240000
ΣΥΝΟΛΟ	350000

Πίνακας 4: Η συνολική μάζα της νασέλας και του ρότορα.



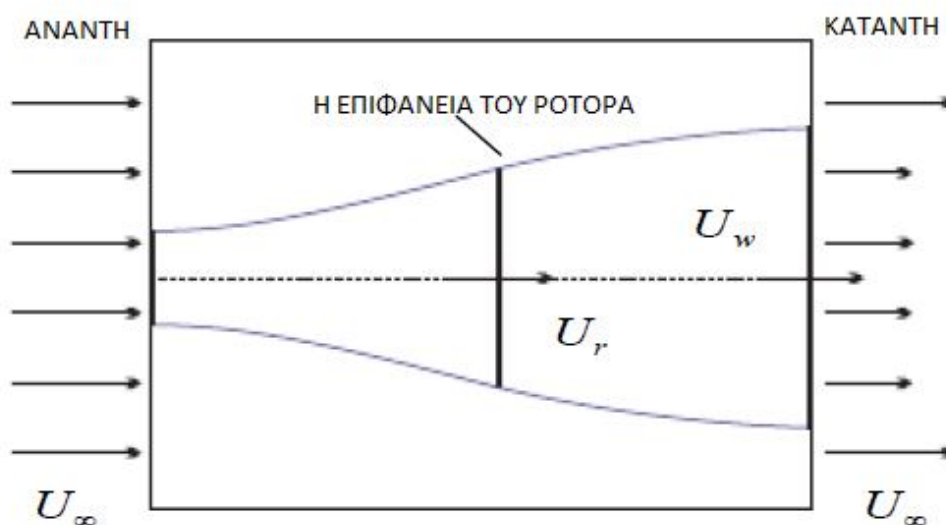
Εικόνα 31: Το φορτίο της ανεμογεννήτριας που ενεργεί στη κορυφή του Πυλώνα λόγω της βαρύτητας, όπως φαίνεται στην εικόνα το βάρος του ρότορα και της νασέλας ενεργεί σε όλη την πάνω επιφάνεια του Πυλώνα.

## 6.2. Η δύναμη της ώσης πάνω στο ρότορα

Η δύναμη της ώσης είναι αξονική δύναμη η οποία εφαρμόζεται στο ρότορα μίας ανεμογεννήτριας και ο υπολογισμός της είναι βασισμένος στη θεωρία των πτερυγώσεων. Αν ο άνεμος απλοποιείται όπως σε ένα ροϊκό σωλήνα και λαμβάνοντας υπόψη την περιοχή με ίσες αποστάσεις άνωθεν και κάτωθεν του ρότορα στο επίπεδο του δίσκου, η δύναμη της ώσης επί του ρότορα (δρομέα) θα είναι:

$$T = \frac{1}{2} \rho_{air} A_r (U_{\infty}^2 - U_w^2)$$

Όπου  $\rho_{air}$  είναι η πυκνότητα του αέρα,  $A_r$  είναι η επιφάνεια του νοητού δίσκου,  $U_{\infty}$  η ταχύτητα ανάντη και  $U_w$  είναι η ταχύτητα κατάντη.



Εικόνα 32: Θεωρία του δίσκου ενέργειας

Ο συντελεστής αξονικής επαγωγής ορίζεται ως η κλασματική μείωση της ταχύτητας του ανέμου από την ανάντη ταχύτητα του έως το ρότορα.

$$a = \frac{U_{\infty} - U_r}{U_{\infty}}$$

Όπου  $U_r$  είναι η ταχύτητα του ανέμου πάνω στο ρότορα και σύμφωνα με τη θεωρία του Betz είναι ίση με:

$$\frac{U_{\infty} + U_w}{2}$$

Σύμφωνα με τη παραπάνω εξίσωση η δύναμη της ώσης πάνω στο ρότορα είναι:

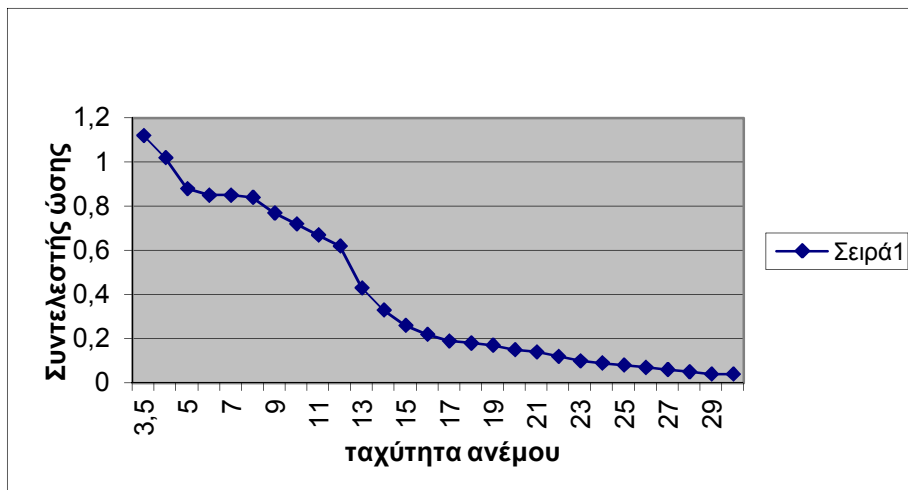
$$T = \frac{1}{2} \rho_{air} A_r U_{\infty}^2 a(1 - a) \quad \text{ή} \quad T = \frac{1}{2} C_T \rho_{air} A_r U_{\infty}^2$$

Όπου το  $C_T$  είναι ο συντελεστής ώσης που ισοδυναμεί με  $4a(1-a)$ .

Για μεγάλες τιμές του παράγοντα επαγωγής ( $a > 0,4$ ), εφαρμόζεται η διόρθωση του Glauert's :

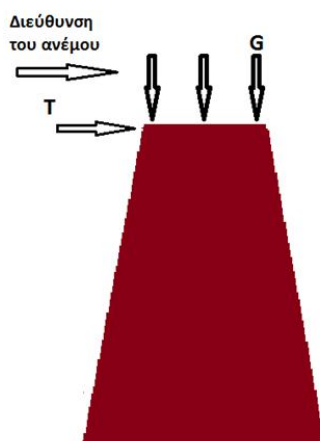
$$C_T = \frac{(a - 0.143)^2 + 0.55106}{0.6427}$$

Ο συντελεστής ώσης για την Repower 5M δίνεται από το παρακάτω διάγραμμα.



Εικόνα 33: διάγραμμα συντελεστή ώσης προς τη ταχύτητα ανέμου της Repower των 5 MW .

Λόγω της στιγμιαίας μεταβολής της κατάστασης του ανέμου ως προς το μέγεθος και την διεύθυνση , η δύναμη της ώσης που επηρεάζει άμεσα την ανεμογεννήτρια μεταβάλλεται συνεχώς. Μεταβάλλεται συνεπώς και η ροπή κάμψης στη βάση στήριξης της δομής . Η δύναμη της ώσης που ενεργεί πάνω στο δρομέα μεταφέρεται στη νασέλα που υποστηρίζεται από ένα περιστρεφόμενο έδρανο. Η δύναμη αυτή πάνω στο περιστρεφόμενο έδρανο ισορροπείται εξαιτίας της αντιδραστικής δύναμη του πυλώνα (δύναμη ανατροπής). Η δύναμη της ώσης που ενεργεί στο δρομέα (ρότορα) είναι παράλληλη προς την επιφάνεια του περιστρεφόμενου εδράνου στήριξης της ανεμογεννήτριας.. Λόγω της αλλαγής της διεύθυνσης του ανέμου η ανεμογεννήτρια περιστρέφεται έτσι ώστε να έχει την αντίθετη διεύθυνση με τον άνεμο. [7]



Εικόνα 34: Η δύναμη της ώσης στο Πυλώνα

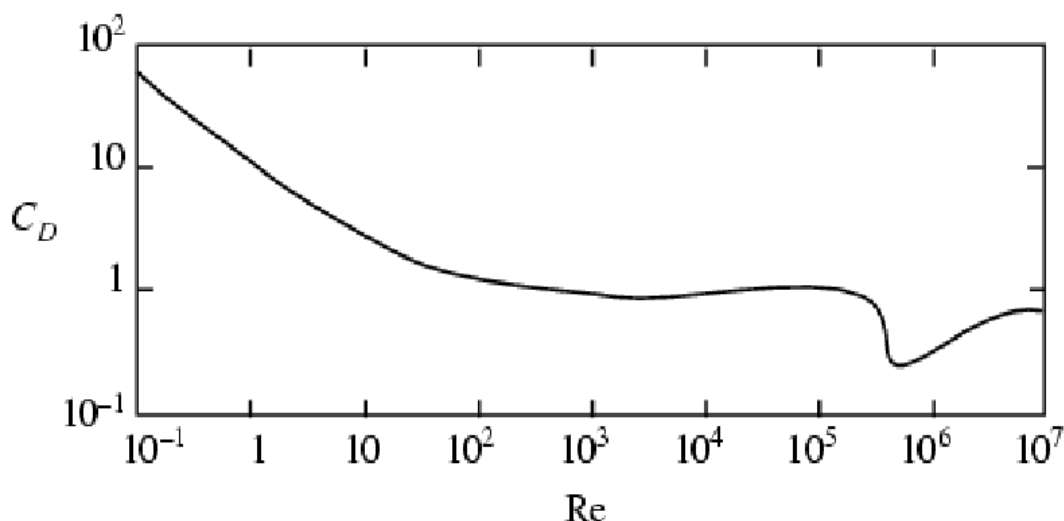
### 6.3. Η δύναμη της οπισθέλκουσας

Όταν ένας κύλινδρος κινείται με σταθερή ταχύτητα  $u$  μέσα σε ρευστό που ηρεμεί ή ο ίδιος κύλινδρος είναι ακίνητος και γύρω του ρέει ρευστό με ομοιόμορφη ταχύτητα και ίση με  $u$  μακριά από αυτόν τότε στο κύλινδρο ασκείται μία δύναμη  $D$  που ονομάζεται οπισθέλκουσα. Η διεύθυνση της  $D$  είναι ίδια με τη διεύθυνση της ταχύτητας του κυλίνδρου, ενώ η φορά της είναι αντίθετη. Ως προς το μέτρο, η  $D$  είναι ανάλογη ενός αδιάστατου συντελεστή  $C_D$  ο οποίος ονομάζεται συντελεστής οπισθέλκουσας. Η  $D$  εξαρτάται επίσης από τη μετωπική επιφάνεια του κυλίνδρου. Θεωρώντας ότι ο πυλώνας έχει κυλινδρική μορφή και το ρευστό είναι ο αέρας με πυκνότητα  $1,225 \text{ kg/m}^3$  τότε η δύναμη της οπισθέλκουσας είναι:

$$D = \frac{1}{2} C_D \rho_{air} A u^2$$

Όπου:

- $\rho$ : Πυκνότητα του ρευστού
- $A$ : Η μέγιστη μετωπική επιφάνεια του σώματος
- $u$ : Η σχετική ταχύτητα σώματος-ρευστού
- $C_D$ : Συντελεστής οπισθέλκουσας οποίος εξαρτάται από τον αριθμό  $Re$  και υπολογίζεται από τον παρακάτω διάγραμμα.



Εικόνα 35: Συντελεστής οπισθέλκουσας για ροή ανέμου γύρω από κύλινδρο με λεία τοιχώματα

Ο αριθμός  $Re$  για κύλινδρο είναι:  $Re = \frac{VD}{\nu}$

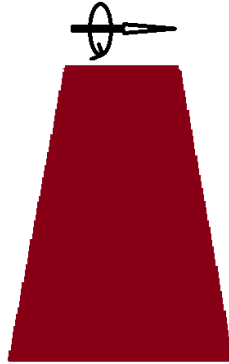
Όπου:

- $V$  είναι η ταχύτητα του ρευστού.
- $D$  είναι η διάμετρος.
- $\nu$  είναι το κινηματικό ιξώδες του ρευστού.

Λόγο ότι για το πυλώνα ο αριθμός  $Re$  έχει μεγάλες τιμές  $Re > 10^7$  ο συντελεστής οπισθέλκουσας θα είναι περίπου ίσως με 0,7. [8]

## 6.4. Η ροπή του ρότορα

Η ροπή του ρότορα ενεργεί και αυτή ως φορτίο πάνω στο πυλώνα της ανεμογεννήτριας. Η ροπή που δημιουργείται από το ρότορα μεταδίδεται στη γεννήτρια μέσω του άξονα χαμηλής ταχύτητας, στο κιβώτιο ταχυτήτων και από τον άξονα της υψηλής ταχύτητας στη γεννήτρια. Η γεννήτρια επομένως υποβάλλεται σε μία ροπή η οποία μεταφέρεται στην επιφάνεια του πυλώνα. Μία κατακόρυφη δύναμη (κατά τη διεύθυνση του άξονα περιστροφής) προς το πυλώνα θα πρέπει να δημιουργεί πάνω στην επιφάνεια του πυλώνα μία αυξημένη πίεση στο ένα μέρος ενώ στο άλλο μέρος του πυλώνα είναι μειωμένη. Παρά το γεγονός της παρουσίας του κιβωτίου ταχυτήτων και των υπόλειπων μερών της ανεμογεννήτριας που δημιουργούν και αυτά μία ροπή, θεωρείται με βάση τη στατική ισοροποία ότι η συνολική επίδρασή τους πάνω στο πυλώνα είναι ίση με τη ροπή του ρότορα. [7]



Εικόνα 36: Η ροπή του ρότορα.

Στη θεωρία των πτερυγώσεων περιγράφονται οι δυνάμεις της άνωσης και οπισθέλκουσας που ασκούνται πάνω σε μία πτερύγωση. Μία πλήρης πτερύγωση αποτελείται από διάφορους τύπους αεροτομών με διαφορετικά χαρακτηριστικά. Οι δυνάμεις της άνωσης και οπισθέλκουσας που ενεργούν πάνω σε μία πτερύγωση εξαρτώνται από το τύπο της πτερύγωσης, τη πυκνότητα του αέρα και την ταχύτητα με την οποία προσκρούει ο άνεμος πάνω στην επιφάνεια της πτερύγωσης. Οι εξισώσεις που εκφράζουν τις δυνάμεις αυτές είναι οι παρακάτω:

$$\Delta F_L = \frac{1}{2} \rho_{air} c u^2 C_L \Delta r_b \quad \& \quad \Delta F_D = \frac{1}{2} \rho_{air} c u^2 C_D \Delta r_b$$

Όπου  $\rho_{air}$  είναι η πυκνότητα του αέρα,  $c$  είναι το μήκος της χορδής της πτερύγωσης,  $u$  είναι η ταχύτητα του ανέμου,  $C_L$  και  $C_D$  είναι οι συντελεστές της άνωσης και της οπισθέλκουσας και  $\Delta r_b$  είναι το μήκος της πτερύγωσης.

Η εφαπτομενική δύναμη  $F_t$  εκφράζεται ως συνάρτηση της οπισθέλκουσας και της δύναμης της άνωσης.

$$\Delta F_t = N_b (\Delta F_L \sin \varphi - \Delta F_D \cos \varphi) = \frac{1}{2} \rho_{air} N_b c u^2 (C_L \sin \varphi - C_D \cos \varphi) \Delta r_b$$

Όπου  $N_b$  είναι ο αριθμός των πτερυγίων.

Και η ροπή του ρότορα είναι:

$$\Delta Q = \Delta F_t r_b$$

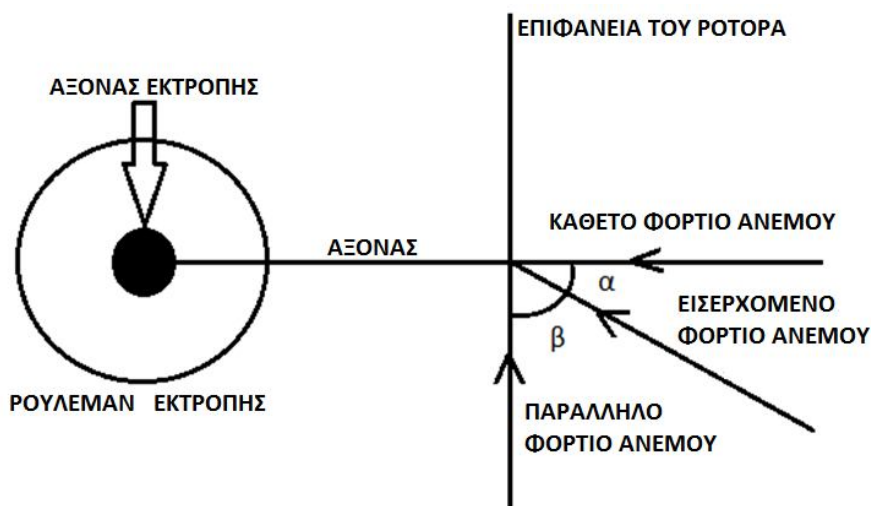
Όπου  $r_b$  είναι η ακτίνα του πτερυγίου του ρότορα.

Επίσης η ροπή του ρότορα μπορεί να βρεθεί από το  $\Delta Q = P/\omega$

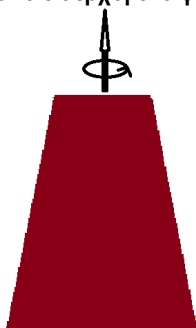
Όπου  $\omega$  είναι η γωνιακή ταχύτητα και  $P$  είναι η ισχύς που είναι  $P = T U_\infty$ .

Όταν η διεύθυνση του ανέμου δεν είναι ευθυγραμμισμένη με τον άξονα του ρότορα, ένα μέρος του αεροδυναμικού φορτίου που προσκρούει στην επιφάνεια του ρότορα αναγκάζει την ανεμογεννήτρια να περιστραφεί ώστε να υπάρχει μικρότερη γωνία μεταξύ του εισερχόμενου αέρα και τον άξονα του ρότορα. Στις σύγχρονες ανεμογεννήτριες αυτό επιτυγχάνεται μετρώντας τη διεύθυνση μ' ένα διευθυνσιόμετρο και προσανεμίζοντας ολόκληρη τη νασέλα με τη βοήθεια κινητήρων και οδοντωτών τροχών.

Κατά πόσο θα περιστραφεί η ανεμογεννήτρια εξαρτάται από πολλούς παράγοντες. Από τη κατάσταση του ανέμου και τη γωνία μεταξύ του εισερχόμενου αέρα και τον άξονα του ρότορα. Επιπλέον η απόσταση του ρότορα από τον άξονα περιστροφής είναι και αυτή μία σημαντική παράμετρος γιατί καθορίζει τη ροπή εκτροπής, η απόσταση αυτή έχει ένα πλεονέκτημα ότι μειώνεται η ροπή εκτροπής πάνω στο πυλώνα.



Εικόνα 37 :Όταν δεν είναι ευθυγραμμισμένο το εισερχόμενο φορτίο του ανέμου με τον άξονα του ρότορα.



Εικόνα 38: Ροπή εκτροπής πάνω στο πυλώνα.

Σύμφωνα με την εικόνα 37 ο τύπος για τη ροπή εκτροπής είναι :

$$Y = T \eta \mu \beta \cdot s$$

Όπου s είναι η απόσταση μεταξύ του άξονα εκτροπής και το κέντρο βάρους του ρότορα. [7]

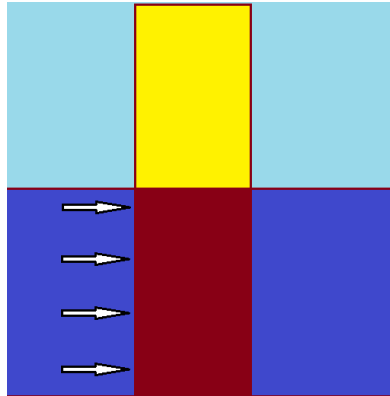
## 6.5. Υδροδυναμικά φορτία

Λόγω της πρόσκρουσης των κυμάτων πάνω στη βάση και τον πυλώνα της ανεμογεννήτριας δημιουργείται μία ταλάντωση στη βάση η οποία μεταφέρεται ως το πιο ψηλό σημείο του πυλώνα. Σε μία κυλινδρική δομή για να βρούμε τα φορτία χρησιμοποιούμε την εξίσωση Morison η οποία αναφέρει ότι οι δυνάμεις που ασκούνται από τη πρόσκρουση των κυμάτων στην επιφάνεια σε ένα κατακόρυφο αντικείμενο που εκτείνεται από τον πυθμένα της θάλασσας και περνάει την ελεύθερη επιφάνεια της θάλασσας αποτελούνται από δύο συνιστώσες, τη δύναμη της αδράνειας και την οπισθέλκουσα. Η δύναμη που ασκείται στη βάση και τον πυλώνα είναι:

$$f = \frac{1}{2} \rho_{water} C_D D u |u| + \rho_{water} C_M A \frac{du}{dt}$$

Όπου  $\rho_{water}$  είναι η πυκνότητα του νερού της θάλασσας,  $C_D$  και  $C_M$  είναι η οπισθέλκουσα και η δύναμη της αδράνειας,  $A$  είναι η διατομή της δομής υποστήριξης και  $u$  είναι η ταχύτητα ροής του νερού. [7]

Και για τη βάση του πυλώνα τα υδροδυναμικά φορτία εξασκούνται σε όλο το μήκος και το ύψος της βάσης:



Εικόνα 39: Τα φορτία που ασκούνται στη βάση.



## 6.6. Τα φορτία που ασκούνται πάνω στο πυλώνα συνοπτικά

ΦΟΡΤΙΑ	ΜΕΓΕΘΟΣ	ΔΙΕΥΚΡΙΝΙΣΕΙΣ
ΤΟ ΒΑΡΟΣ ΤΗΣ ΝΑΣΕΛΛΑΣ ΜΕ ΤΟΥ ΡΟΤΟΡΑ	$350 \times 9,8 \text{ kN}$	ΕΝΕΡΓΕΙ ΣΤΗ ΚΟΡΥΦΗ ΤΟΥ ΠΥΛΩΝΑ
Η ΔΥΝΑΜΗ ΤΗΣ ΩΣΗΣ	$T = \frac{1}{2} C_T \rho_{\text{air}} A_r U_{\infty}^2$	ΤΟ ΜΕΓΕΘΟΣ ΚΑΙ Η ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ ΤΟΥ ΑΝΕΜΟΥ ΑΛΛΑΖΕΙ ΣΥΝΕΧΩΣ ΑΝΑΛΟΓΑ ΜΕ ΤΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΤΟΥ ΑΝΕΜΟΥ
Η ΔΥΝΑΜΗ ΤΗΣ ΟΠΙΣΘΕΛΚΟΥΣΑΣ	$D = \frac{1}{2} C_D \rho_{\text{air}} A u^2$	ΑΣΚΕΙΤΑΙ ΣΤΟ ΠΥΛΩΝΑ
ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΑ ΦΟΡΤΙΑ	$f = \frac{1}{2} \rho_{\text{water}} C_D D u  u  + \rho_{\text{water}} C_M A \frac{du}{dt}$	ΤΑ ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΑ ΦΟΡΤΙΑ ΘΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΟΥΝ ΣΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ SOLIDWORKS
ΡΟΠΗ ΤΟΥ ΡΟΤΟΡΑ	$\Delta Q = P/\omega$ Όπου $\omega = 12,1 \text{ rpm} * \frac{2\pi}{60} = 1,27 \text{ (rad/sec)}$ και P είναι η ισχύς που είναι $P = T U_{\infty}$	ΕΝΕΡΓΕΙ ΣΤΗ ΚΟΡΥΦΗ ΤΟΥ ΠΥΛΩΝΑ
ΡΟΠΗ ΕΚΤΡΟΠΗΣ	$Y = T \eta \mu \beta \cdot 5 \text{ m}$	ΕΞΑΡΤΑΤΑΙ ΑΠΟ ΤΙΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΤΟΥ ΑΝΕΜΟΥ ΚΑΙ ΑΝ ΕΙΝΑΙ ΕΥΘΥΓΡΑΜΜΙΣΜΕΝΟΣ Ο ΑΞΟΝΑΣ ΤΟΥ ΡΟΤΟΡΑ ΜΕ ΤΗ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ ΤΟΥ ΑΝΕΜΟΥ. ΕΝΕΡΓΕΙ ΣΤΗ ΚΟΡΥΦΗ ΤΟΥ ΠΥΛΩΝΑ . ΤΟ ΚΕΝΤΡΟ ΒΑΡΟΥΣ ΤΟΥ ΡΟΤΟΡΑ ΒΡΙΣΚΕΤΑΙ 5 m ΑΠΟ ΤΟΝ ΑΞΟΝΑ ΕΚΤΡΟΠΗΣ
Η ΡΟΠΗ ΠΟΥ ΔΗΜΙΟΥΡΓΕΙΤΑΙ ΑΠΟ ΤΟ ΒΑΡΟΣ ΤΗΣ ΝΑΣΕΛΛΑΣ	$240 \times 9,8 \times 1,9 \text{ kNm}$	ΤΟ ΚΕΝΤΡΟ ΒΑΡΟΥΣ ΤΗΣ ΝΑΣΕΛΛΑΣ ΒΡΙΣΚΕΤΑΙ 1,9m ΑΠΟ ΤΟΝ ΑΞΟΝΑ ΕΚΤΡΟΠΗΣ
Η ΡΟΠΗ ΠΟΥ ΔΗΜΙΟΥΡΓΕΙΤΑΙ ΑΠΟ ΤΟ ΒΑΡΟΣ ΤΟΥ ΡΟΤΟΡΑ	$110 \times 9,8 \times 5 \text{ kNm}$	ΤΟ ΚΕΝΤΡΟ ΒΑΡΟΥΣ ΤΟΥ ΡΟΤΟΡΑ ΒΡΙΣΚΕΤΑΙ 5 m ΑΠΟ ΤΟΝ ΑΞΟΝΑ ΕΚΤΡΟΠΗΣ

Πίνακας 5: Τα φορτία που ασκούνται στο πυλώνα.[7]

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ ΕΛΕΓΧΟΥ ΑΝΤΟΧΗΣ ΤΟΥ ΠΥΛΩΝΑ ΜΕ ΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ SOLIDWORKS

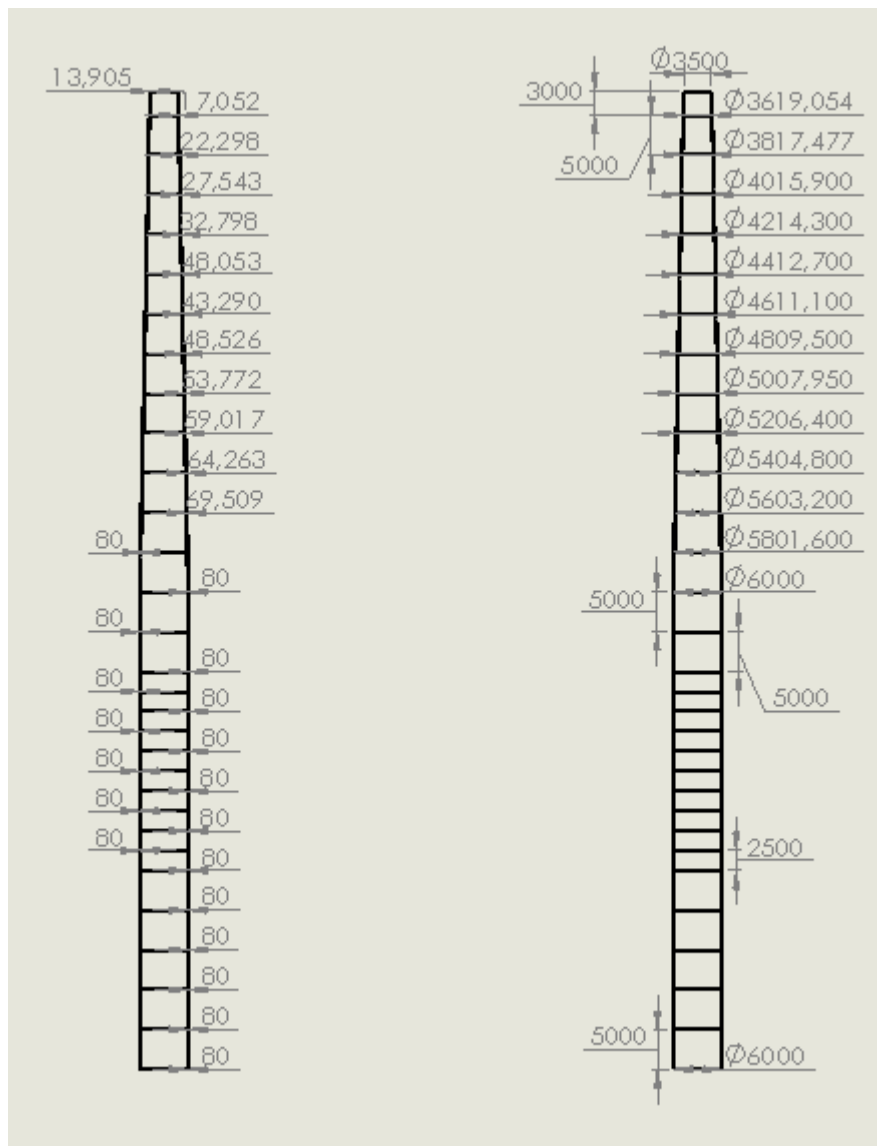
### 7.1. Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό θα σχεδιαστεί και θα εξεταστεί ένας πυλώνας ως προς την αντοχή του σύμφωνα με τα φορτία που αναφερθήκαν στο κεφάλαιο 6 και με βάση τις περιπτώσεις φόρτισης (Load cases), σύμφωνα με το πρότυπο IEC 61400-3 για παράκτιες ανεμογεννήτριες που φαίνονται στο πίνακα 6.

Έχει επιλεχθεί ένας πυλώνας με βάση τύπου monopile οποίος πρόκειται να εγκατασταθεί στη θάλασσα σε βάθος 20 μέτρων τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του πυλώνα είναι από το : HAWC load Simulation of Generic 5 MW offshore Wind Turbine Model [10]. Το υλικό που χρησιμοποιήθηκε είναι S355 με συντελεστή ασφαλείας 277 MPa [4].

Station Number	Height (m)	Diameter (m)	Wall thickness (mm)	Material	Mass/unit length (kg/m)	Stiffness (Nm <sup>2</sup> )
1.00	-45.00	6.000	80.00	steel	1.168E+04	1.369E+12
2.00	-40.00	6.000	80.00	steel	1.168E+04	1.369E+12
3.00	-35.00	6.000	80.00	steel	1.168E+04	1.369E+12
4.00	-30.00	6.000	80.00	steel	1.168E+04	1.369E+12
5.00	-25.00	6.000	80.00	steel	1.168E+04	1.369E+12
6.00	-20.00	6.000	80.00	steel	1.168E+04	1.369E+12
7.00	-17.50	6.000	80.00	steel	1.168E+04	1.369E+12
8.00	-15.00	6.000	80.00	steel	1.168E+04	1.369E+12
9.00	-12.50	6.000	80.00	steel	1.168E+04	1.369E+12
10.00	-10.00	6.000	80.00	steel	1.168E+04	1.369E+12
11.00	-7.50	6.000	80.00	steel	1.168E+04	1.369E+12
12.00	-5.00	6.000	80.00	steel	1.168E+04	1.369E+12
13.00	-2.50	6.000	80.00	steel	1.168E+04	1.369E+12
14.00	0.00	6.000	80.00	steel	1.168E+04	1.369E+12
15.00	2.50	6.000	80.00	steel	1.168E+04	1.369E+12
16.00	5.00	6.000	80.00	steel	1.168E+04	1.369E+12
17.00	10.00	6.000	80.00	steel	1.168E+04	1.369E+12
18.00	15.00	6.000	80.00	steel	1.168E+04	1.369E+12
19.00	25.00	5.6032	69.509	steel	9.4858E+03	9.715E+11
20.00	35.00	5.2064	59.017	steel	7.4917E+03	6.638E+11
21.00	45.00	4.8095	48.526	steel	5.6976E+03	4.319E+11
22.00	55.00	4.4127	38.035	steel	4.1034E+03	2.626E+11
23.00	65.00	4.0159	27.543	steel	2.7091E+03	1.441E+11
24.00	78.00	3.500	13.905	steel	1.1954E+03	4.858E+10

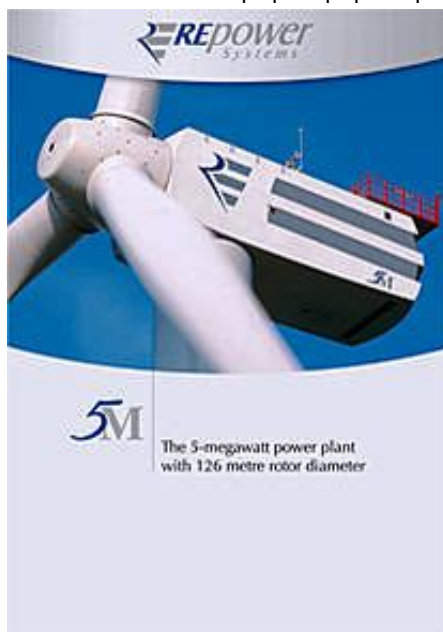
Εικόνα 40: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά του πυλώνα μαζί με τη βάση. [10]



**Εικόνα 41: Σχέδιο του πυλώνα μαζί με τη βάση monopile.**

Στην εικόνα αυτή φαίνονται οι διαστάσεις του πυλώνα και της βάσης που είναι monopile σε χιλιοστά. Αριστερά είναι το πάχος των τοιχομάτων του πυλώνα και δεξιά είναι το ύψος και η διάμετρος του πυλώνα. Η βάση έχει 45 m μήκος από τα οποία τα 25 m είναι μέσα στο έδαφος και τα υπόλοιπα 20 m είναι στη θάλασσα η διατομή της βάσης είναι διάμετρος 6 m με πάχος 80 mm. Ο πυλώνας από την επιφάνεια της θάλασσας και μετά έχει ύψος 78 m.

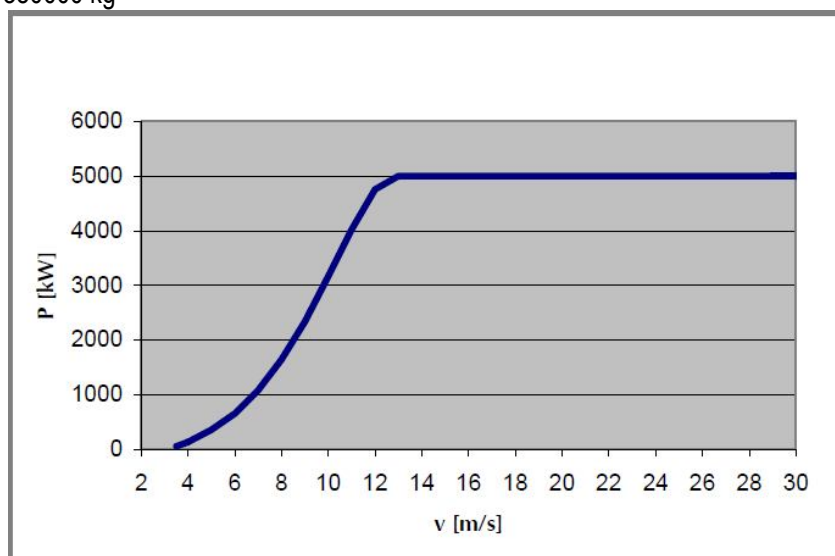
Ο υπολογισμός ελέγχου αντοχής του πυλώνα είναι με βάση την ανεμογεννήτρια της Repower των 5 MW .



Εικόνα 42: Repower 5 MW [13]

Τα τεχνικά χαρακτηριστικά της είναι :

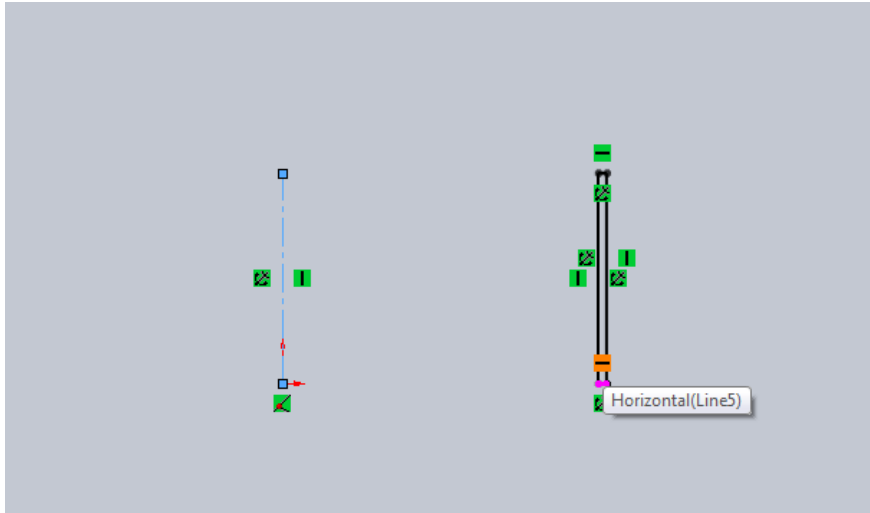
- Ονομαστική ισχύς: 5 MW
- Αρχική ταχύτητα ανέμου: 3,5 m/s
- Ονομαστική ταχύτητα ανέμου : 13 m/s
- Ταχύτητα διακοπής της λειτουργίας της: 25 m/s για την χερσαία και 30 m/s για την παράκτια
- Χαρακτηριστικά του ρότορα:
- Διάμετρος : 126 m
- Αριθμός φτερών: 3
- Εύρος ταχυτήτων, κανονική λειτουργία : περίπου 6,9 έως 12,1 rpm
- Συνολική μάζα:
  1. Ρότορας ( φτερά , πλήμνη): 110000 kg
  2. Νασέλα : 240000 kg
  3. Σύνολο 350000 kg



Εικόνα 43. Καμπύλη ισχύος της Repower των 5 MW. [12]

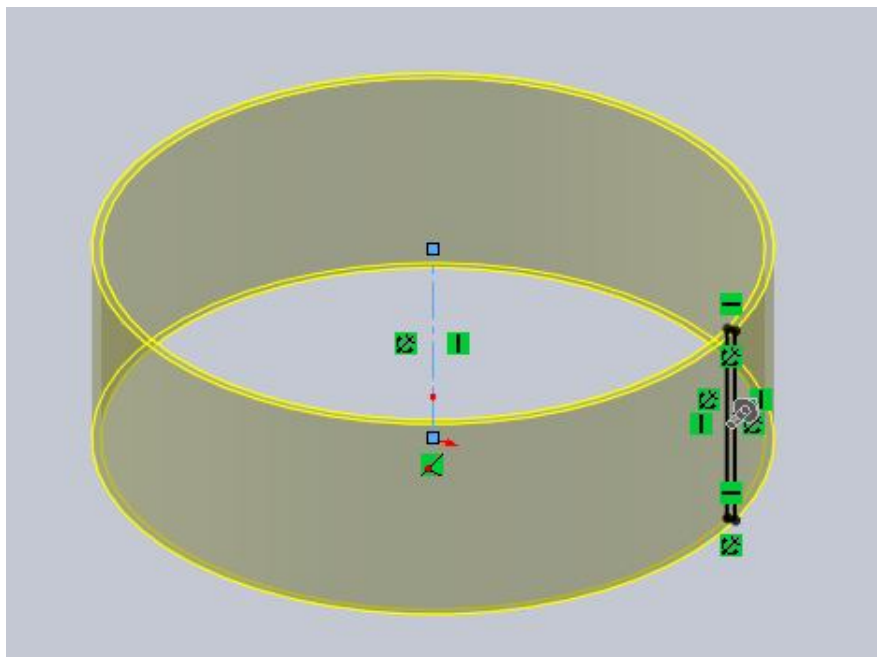
## 7.2. Σχεδίαση του πυλώνα με τη monopile βάση στο πρόγραμμα solidworks

Στην αρχή γίνεται το σκίτσο όπως φαίνεται στη παρακάτω εικόνα.

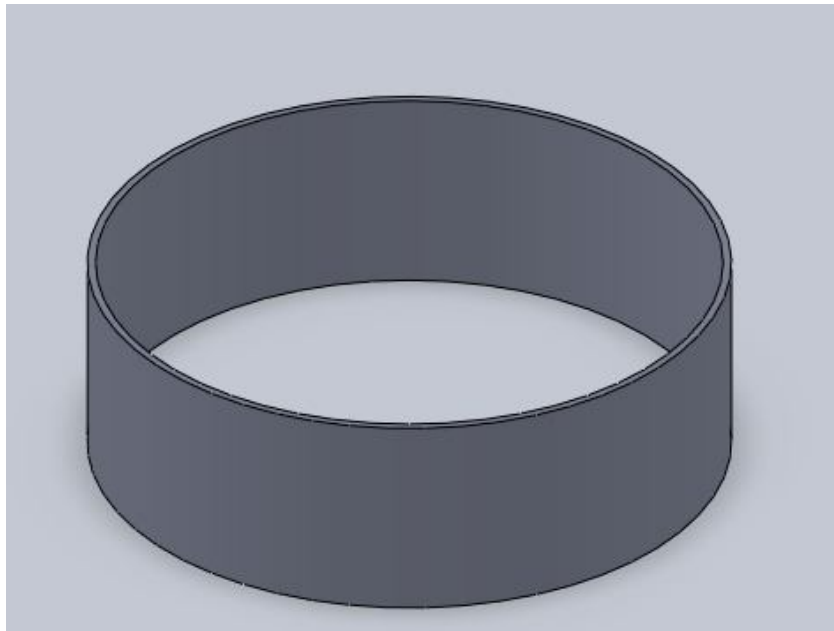


**Εικόνα 44: Σχεδιασμός των parts**

Το κάνουμε fully define και μετά με την επιλογή revolve έχουμε το αποτέλεσμα στη παρακάτω εικόνα.

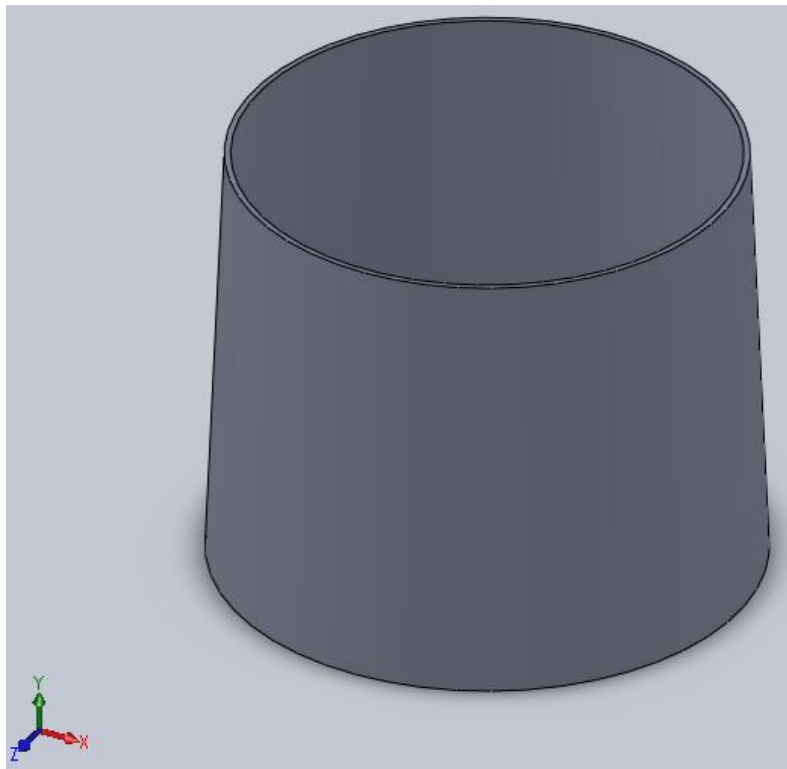


**Εικόνα 45 : Η εντολή revolve.**

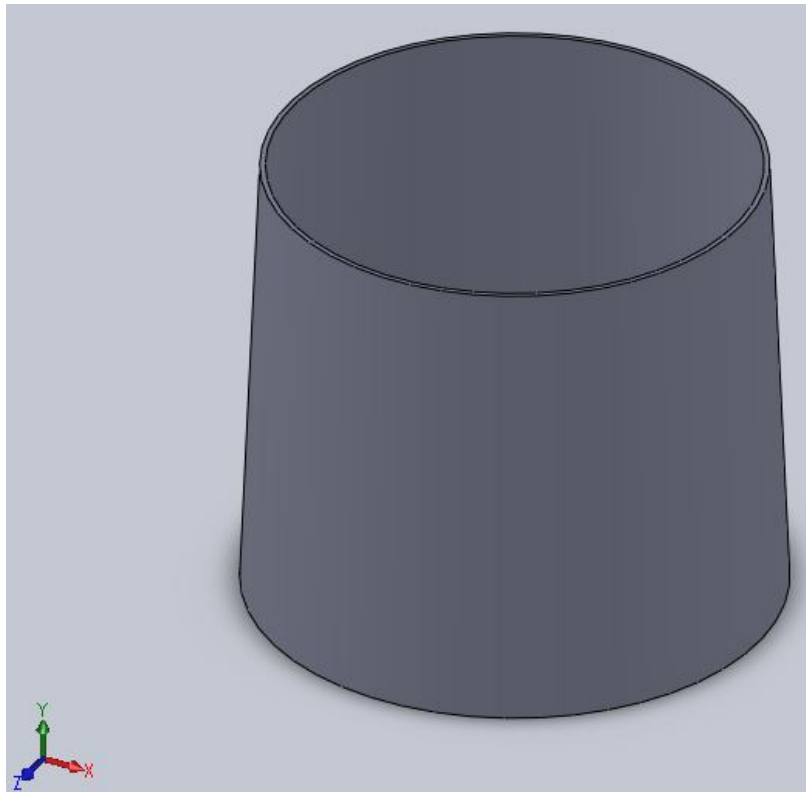


**Εικόνα 46 : Ολοκληρωμένο part**

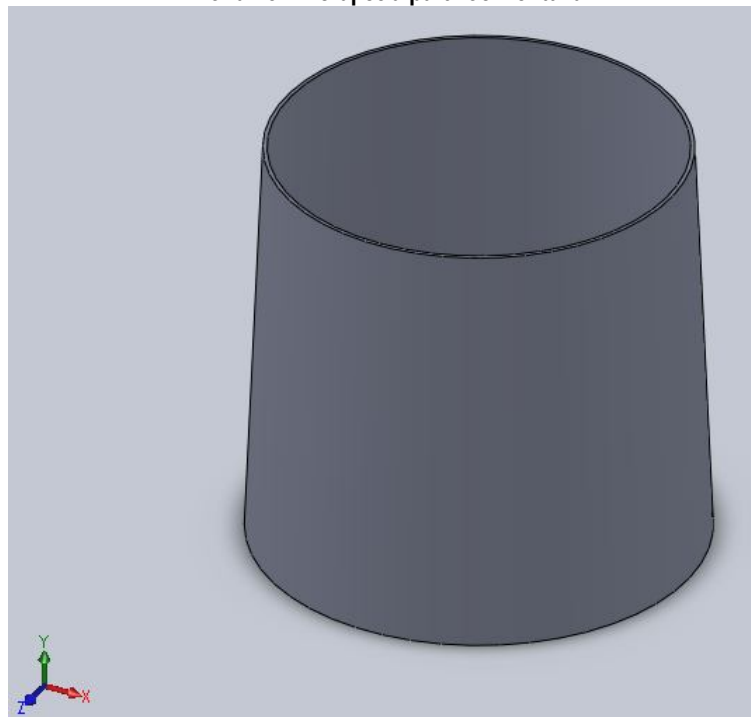
Με τον ίδιο τρόπο φτιάχτηκαν και τα υπόλοιπα parts.



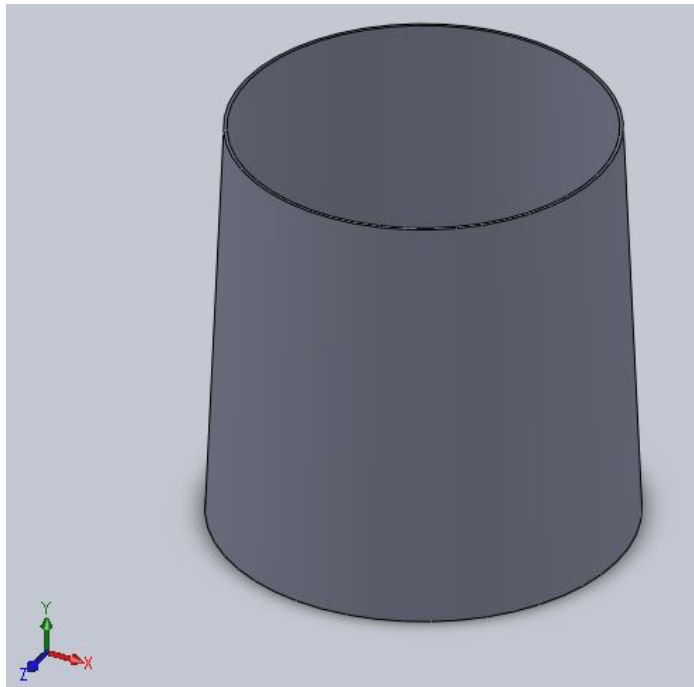
**Εικόνα 47: Είναι η αρχή του πυλώνα.**



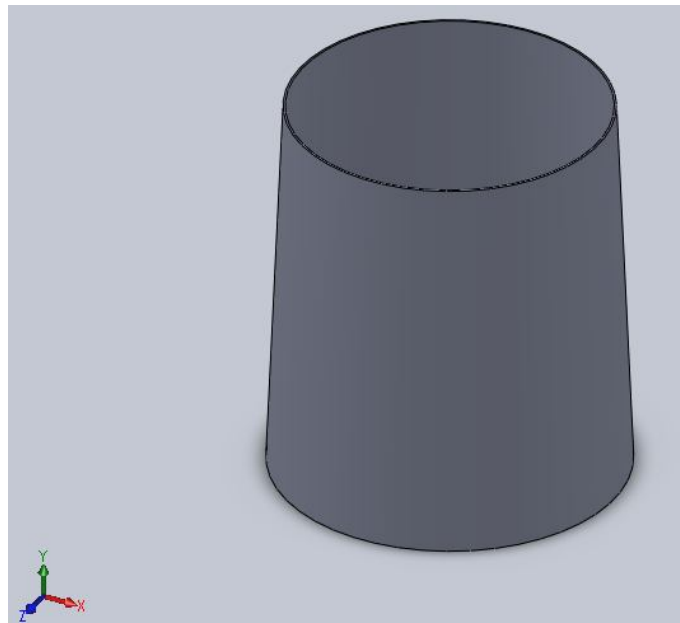
**Εικόνα 48: Ενδιάμεσα part του πυλώνα.**



**Εικόνα 49: Ενδιάμεσα part του πυλώνα.**

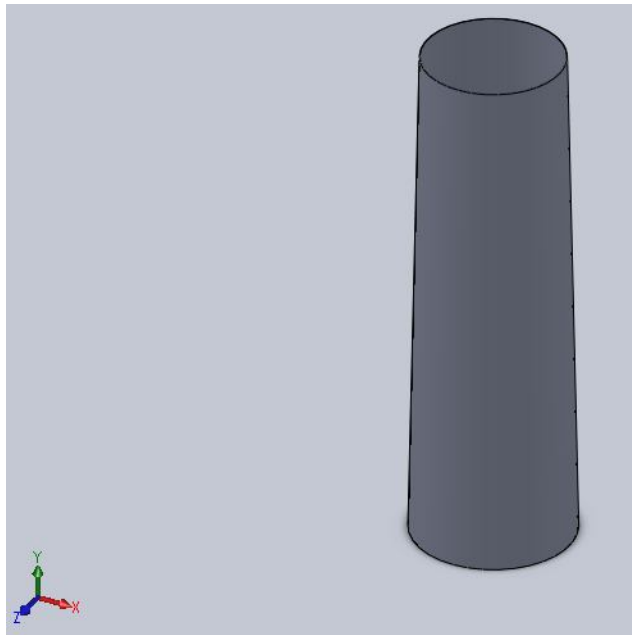


**Εικόνα 50: Ενδιάμεσα part του πυλώνα.**



**Εικόνα 51: Ενδιάμεσα part του πυλώνα.**

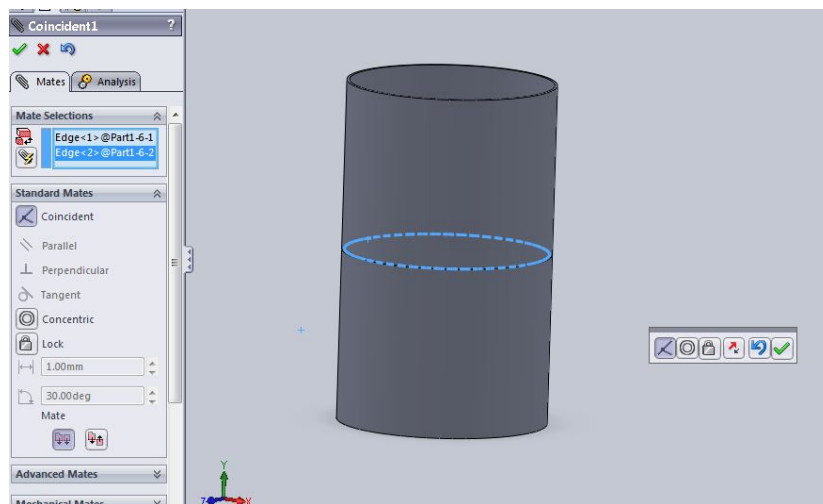




Εικόνα 52: Είναι το τελευταίο part όπου στη κορυφή τοποθετείτε η νασέλα με το ρότορα.

Στη συνέχεια θα γίνει η συναρμολόγηση των parts για να ολοκληρωθεί ο πυλώνας της ανεμογεννήτριας.

Πατάμε στην επιλογή bronze για να βάλουμε το πρώτο part και μετά insert, μετά από αυτή τη διαδικασία πατάμε mate για να κολλήσει το ένα part με το άλλο επιλέγοντας τις επιφάνειες που θα ενωθούν . όπως φαίνεται την παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 53: Εντολή mate.



**Εικόνα 54:** Εδώ φαίνεται ο πυλώνας με τη βάση ολοκληρωμένος.

Εδώ είναι ολοκληρωμένος ο πυλώνας με τη βάση μονοριπλε. Με το κόκκινο χρώμα είναι το σημείο που είναι στη θάλασσα και το μαύρο είναι αυτό που διεισδύει μέσα στο έδαφος.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΦΟΡΤΙΩΝ ΓΙΑ ΤΟΝ ΕΛΕΓΧΟ ΑΝΤΟΧΗΣ ΤΟΥ ΠΥΛΩΝΑ ΣΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ SOLIDWORKS ΚΑΙ ΤΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

## 8.1. Περιπτώσεις φόρτισης (Load cases)

Η ανάλυση των φορτίων είναι για τον έλεγχο της αντοχής της δομής μίας ανεμογεννήτριας εκτελώντας μία σειρά περιπτώσεων φορτίσεων για να καθορίσουν ποια είναι τα ακραία φορτία κόπωσης (π.χ. οι δυνάμεις και οι ροπές) που ασκούνται στην ανεμογεννήτρια κατά τη διάρκεια της ζωής της. Οι περιπτώσεις φορτίσεων (Load Cases) καλύπτουν τις βασικές καταστάσεις λειτουργίας μιας ανεμογεννήτριας όπως όταν η ανεμογεννήτρια παράγει ηλεκτρισμό, παράγει ηλεκτρισμό και παρουσιάζει βλάβη, σε κατάσταση ακινησίας, σε κατάσταση ακινησίας και παρουσιάζει βλάβη, σε κανονικές και ακραίες εξωτερικές συνθήκες και με πιθανά σενάρια βλάβης όπως είναι στο πίνακα 6.

Η Διεθνής ηλεκτροτεχνική Επιτροπή IEC (International Electrotechnical Commission) ορίζει πολλές περιπτώσεις φορτίσεων αλλά δεν θεωρείται απαραίτητο και για αυτό χρησιμοποιούνται ορισμένες περιπτώσεις φορτίσεων με τα πιο ακραία φορτία που ασκούνται στην ανεμογεννήτρια. [11]

Σύμφωνα με το πρότυπο IEC 61400-3 για παράκτιες ανεμογεννήτριες.

A/A	Ταχύτητα ανέμου $U_{\infty}$ (m/s)	Χαρακτηριστικά ανέμου	Ύψος κύματος $H_s$ (m)	Κατάσταση της Θάλασσας	Κατάσταση ανεμογεννήτριας	Συντελεστής φορτίου
<b><u>Η ανεμογεννήτρια παράγει ηλεκτρισμό</u></b>						
1.1	13,5 ( $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$ )	Φυσιολογική τύρβη (NTM)	5,9	Φυσιολογική κατάσταση (NSS)	Κανονική λειτουργία	1,25*1,2
1.3	13,5 ( $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$ )	Ακραία τύρβη (ETM)	5,9	Φυσιολογική κατάσταση (NSS)	Κανονική λειτουργία	1,35
1.4	15,5 ( $V_{hub} = V_r, V_r \pm 2$ m/s)	Ριπή ανέμου και μεταβολή διεύθυνσης (ECD)	5,9	Φυσιολογική κατάσταση (NSS)	Σε λειτουργία και περιστρέφεται η νασέλα	1,35
1.5	13,5 ( $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$ )	Ακραία διάτμηση ανέμου (EWS)	1,6	Φυσιολογική κατάσταση (NSS)	Σε λειτουργία, περιστρέφεται η νασέλα και μεταβάλλονται οι στροφές του ρότορα	1,35
1.6	25 ( $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$ )	Φυσιολογική τύρβη (NTM)	15,04	Ακραίες συνθήκες θαλάσσης (ESS)	Κανονική λειτουργία	1,35

### Η ανεμογεννήτρια παράγει ηλεκτρισμό και παρουσιάζει βλάβη

2.1	13,5 ( $V_{hub}=V_r, V_{out}$ )	Φυσιολογική τύρβη (NTM)	5,9	Φυσιολογική κατάσταση (NSS)	Βλάβη στο σύστημα ελέγχου ή χάσιμο του δικτύου	1,35
2.3	15,5 ( $V_{hub}=V_r, V_r \pm 2$ m/s, $V_{out}$ )	Ριπή ανέμου (EOG)	5,9	Φυσιολογική κατάσταση (NSS)	Βλάβη στο σύστημα ελέγχου ή χάσιμο του δικτύου	1,1

### Η ανεμογεννήτρια σε κατάσταση ακινησίας

6.1	47,5 ( $V_{hub}=0,95*V_{50}$ )	Ακραία ταχύτητα ανέμου (EWM)	15,04	Ακραίες συνθήκες θαλάσσης (ESS)	Νασέλα βρίσκεται υπό κλίση 0° έως 8°	1,35
6.2	47,5 ( $V_{hub}=0,95*V_{50}$ )	Ακραία ταχύτητα ανέμου (EWM)	15,04	Ακραίες συνθήκες θαλάσσης (ESS)	Απώλεια του δικτύου και περιστροφή νασέλας από -180° έως 180°	1,1
6.3	38 ( $V_{hub}=0,95*V_1$ )	Ακραία ταχύτητα ανέμου (EWM)	11,77	Ακραίες συνθήκες θαλάσσης (ESS)	Νασέλα βρίσκεται υπό κλίση 0° έως 20°	1,35

### Η ανεμογεννήτρια σε κατάσταση ακινησίας και παρουσιάζει βλάβη

7.1	38 ( $V_{hub}=0,95*V_1$ )	Ακραία ταχύτητα ανέμου (EWM)	15,04	Ακραίες συνθήκες θαλάσσης (ESS)	Δεν περιστρέφεται καθώς έχουν ενεργοποιηθεί τα φρένα, βρίσκεται και υπό κλίση 0° έως 8°	1,1
-----	---------------------------	------------------------------	-------	---------------------------------	---	-----

Πίνακας 6: Περιπτώσεις φορτίσεων (IEC 61400-3). [11]

Όπου:

$V_{50}$  = 50 m/s (Είναι η μέση ταχύτητα για μία περίοδο 50 χρόνων).

$V_1$  = 40 m/s (Είναι η μέση ταχύτητα για μία περίοδο 1 χρόνου).

$V_{hub}$  = Η ταχύτητα του ανέμου πάνω στο ρότορα.

$V_{in}$  = Ταχύτητα ανάντη

$V_{out}$  = Ταχύτητα κατόντη

Α/Α	ΟΡΙΣΜΟΣ	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ
ECD	Ριπή ανέμου και μεταβολή διεύθυνσης	Αυτό το ντετερμινιστικό μοντέλο αέρα αποτελείται από μία ριπή αέρα που εφαρμόζεται σε ένα ομοιόμορφο προφίλ αέρα. Η ταχύτητα του αέρα είναι 15 m/s κατά τη διάρκεια μίας περιόδου 10 s.
EOG	Ριπή ανέμου	Αυτό το ντετερμινιστικό μοντέλο αέρα αποτελείται από μία ριπή ανέμου (μπουρίνι) που εφαρμόζεται σε ένα ομοιόμορφο προφίλ αέρα. Η ριπή ανέμου αυτή έχει μία περίοδο πάνω από 10,5-s, η ριπή αυτή πρώτα μειώνεται μετά αυξάνεται μέχρι ένα ανώτατο όριο και μετά μειώνεται πάλι μέχρι να σταματήσει.
ESS	Ακραίες συνθήκες θαλάσσης	Ακραίες συνθήκες θαλάσσης είναι παρόμοια με το NSS αλλά χρησιμοποιεί ένα φάσμα του Jonswar που προέρχεται από 1 έως 50 χρόνια μετρήσεων του ύψος κύματος με μία μέγιστη φασματική περίοδο. όπως και με τη NSS, η κατάσταση διαμορφώνεται ως το άθροισμα των ημιτονοειδών συνιστωσών του κύματος του οποίου το πλάτος καθορίζεται από το φάσμα του κύματος, περιγράφονται από τη θεωρία του Airy.
ETM	Ακραία τύρβη	Αυτό το μοντέλο είναι παρόμοιο με το NTM αλλά αποτελείται από ένα ολοκληρωμένο πεδίο 3 συνιστωσών στοχαστικών μεταβλητών του ανέμου με υψηλότερο επίπεδο απόκλισης στροβιλισμού, το οποίο εξαρτάται από τη κατηγορία της ανεμογεννήτριας και αυξάνεται η ταχύτητα του ανέμου ανάλογα με το ύψος της πλήμνης.
EWM	Ακραία ταχύτητα ανέμου	Αυτό το μοντέλο αποτελείται από ένα ολοκληρωμένο πεδίο 3 συνιστωσών στοχαστικών μεταβλητών του ανέμου με μία τυπική απόκλιση στροβιλισμού 0,11 κάθε 10 λεπτά με μέσο όρο ταχύτητας του ανέμου +0,2 m/s στο ύψος της πλήμνης για 1 ώρα προσομοίωσης.
EWS	Ακραία διάτμηση ανέμου	Αυτό το ντετερμινιστικό μοντέλο αέρα αποτελείται από μία ριπή ανέμου που επιβάλλεται σε ένα ομοιόμορφο προφίλ αέρα. Πάνω από 12-s είναι η περίοδος, στην αρχή η ριπή αυξάνεται μέχρι το ανώτατο όριο και στη συνέχεια μειώνεται μέχρι να σταματήσει.
NSS	Φυσιολογική κατάσταση θαλάσσης	Η φυσιολογική κατάσταση της θάλασσας αυτή, αντιπροσωπεύει στοχαστικά κύματα που διαμορφώνονται ως το άθροισμα ημιτονοειδών συνιστωσών του κύματος του οποίου το πλάτος καθορίζεται από το φάσμα του κύματος, αυτό περιγράφεται στη θεωρία των κυμάτων του Airy. Η κατάσταση της θάλασσας προέρχεται από το φάσμα Jonswar, του οποίου η σύνθεση βασίζεται σε δεδομένες τιμές του σημαντικού ύψους κύματος και στη μέγιστη φασματική περίοδο. Το φάσμα Jonswar μειώνεται κατά το φάσμα του Pierson-Moskowitz σε όλες όμως τις πιο ακραίες καταστάσεις της θάλασσας
NTM	Φυσιολογική τύρβη	Αυτό το μοντέλο αποτελείται από ένα ολοκληρωμένο πεδίο 3 συνιστωσών στοχαστικών μεταβλητών του ανέμου με μία τυπική απόκλιση στροβιλισμού 90%, το οποίο εξαρτάται από τη κατηγορία της ανεμογεννήτριας και αυξάνεται η ταχύτητα του ανέμου ανάλογα με το ύψος της πλήμνης.

**Πίνακας 7: Περιγραφή των χαρακτηριστικών του ανέμου και της κατάστασης της θάλασσας του Load Cases. [11]**

Για τους υπολογισμούς των φορτίων χρησιμοποιήθηκαν οι παράμετροι που αναφέρονται στις περιπτώσεις φόρτισης σύμφωνα με το πρότυπο IEC 61400-3 για παράκτιες ανεμογεννήτριες . Από τον πίνακα 6 επιλέχθηκαν οκτώ περιπτώσεις για τον υπολογισμό των φορτίσεων. Αυτές είναι: 1.1, 1.4, 1.5, 1.6, 2.1, 2.3, 6.1, 7.1.

## **8.2. Συνοριακές συνθήκες- στηρίξεις.**

Για να δηλώσουμε στο πρόγραμμα solidworks πως στηρίζεται η βάση του πυλώνας πρέπει να ξεκινήσουμε το simulation και μετά να γίνει η ανάλυση αντοχής στο πρόγραμμα . Αυτό γίνεται με τα εξής βήματα :

1<sup>ο</sup> βήμα

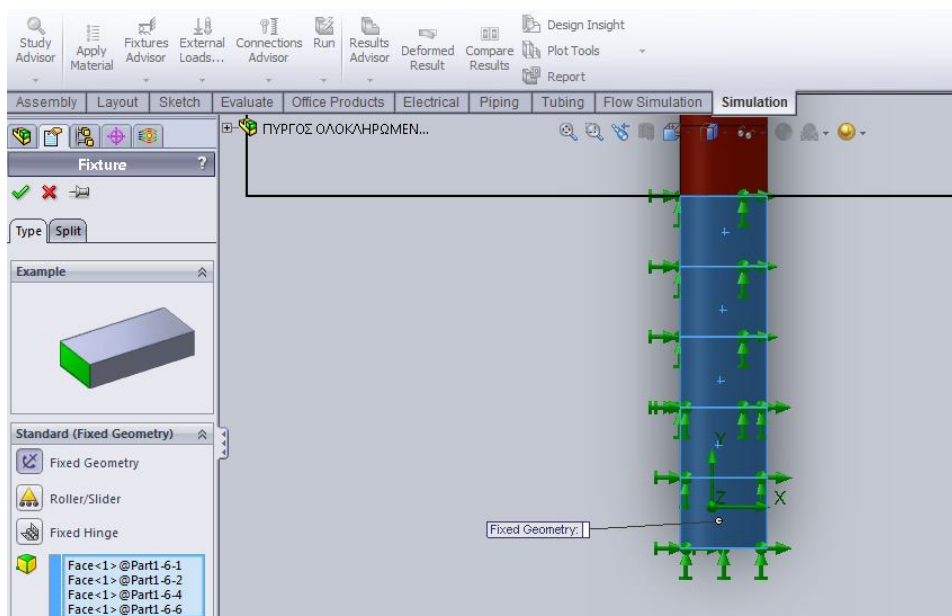
Επιλέγουμε το simulation και πατάμε new study.

2<sup>ο</sup> βήμα

Πατάμε Apply material για να γίνει η επιλογή του υλικού το οποίο είναι "S355"

3<sup>ο</sup> βήμα

Πατάμε στο Fixtures advisors και επιλέγουμε Fixed Geometry και του ορίζουμε τα σημεία



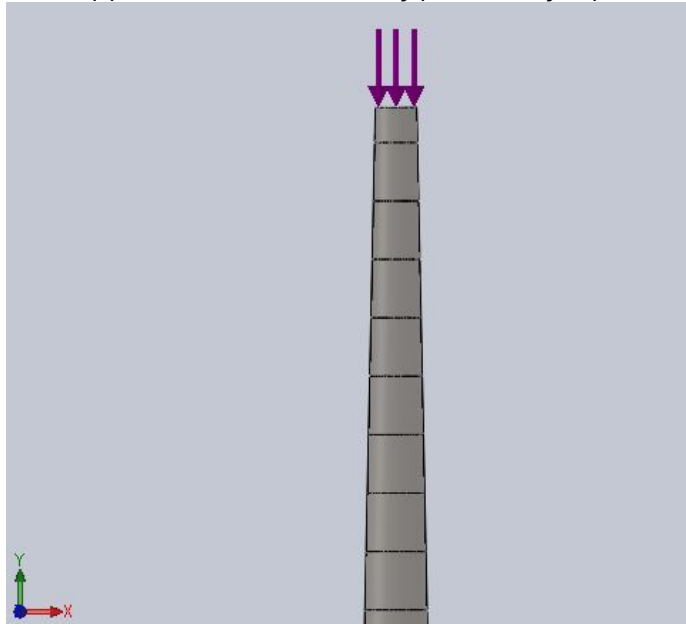
**Εικόνα 55 :εντολή Fixture.**

Μετά από την επιλογή των σημείων όπου στηρίζεται η βάση δηλώνουμε στο πρόγραμμα ότι είναι πακτωμένο στο έδαφος.

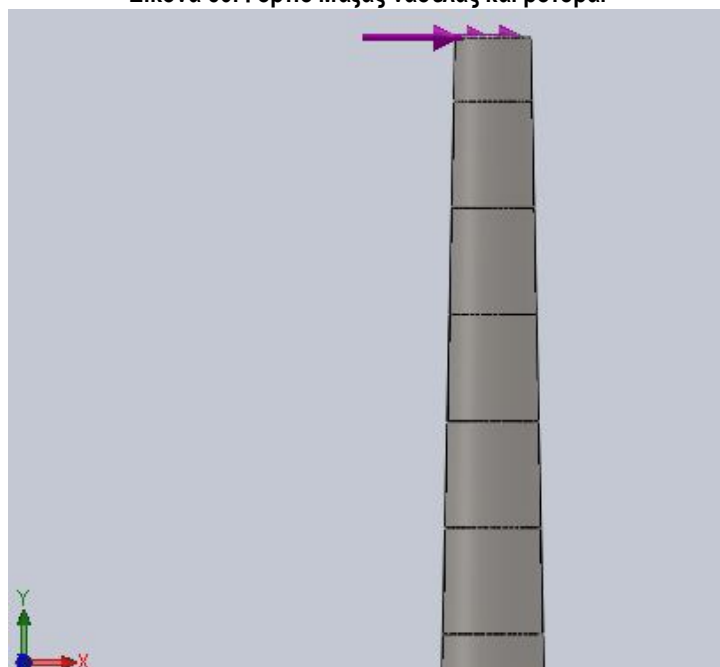
### **8.3. Εφαρμογή των φορτίων.**

Για να μπουν οι δυνάμεις που ασκούνται πάνω στο πυλώνα που είναι το βάρος της ανεμογεννήτριας, η ροπή του ρότορα (κατά τη λειτουργία της ανεμογεννήτριας), η δύναμη της ώσης, η ροπή εκτροπής και τα υδροδυναμικά φορτία που ασκούνται στη βάση της ανεμογεννήτριας τα οποία υπολογίστηκαν με flow simulation. Ακολουθείται η εξής διαδικασία:

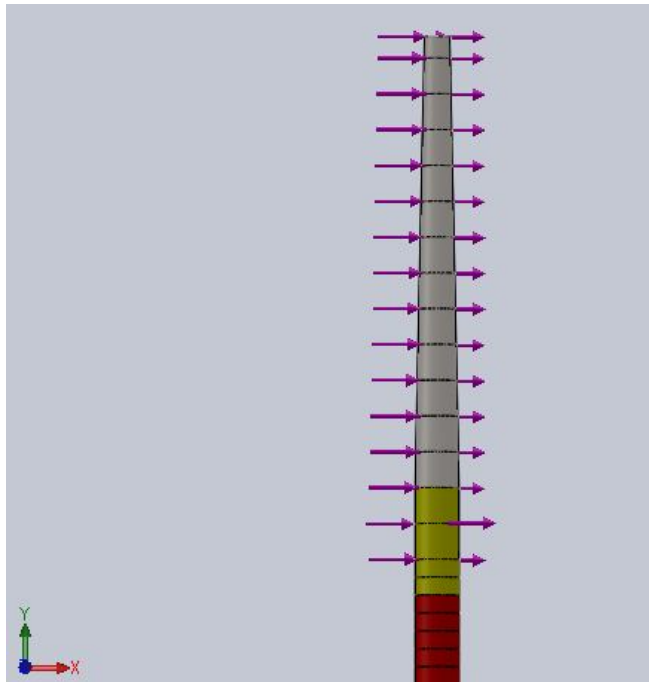
1. Πατάμε στο external loads και επιλέγουμε force. Στην εντολή Force δηλώνουμε τη δύναμη και επιλέγουμε το σημείο ή τα σημεία που ενεργεί πάνω στο πυλώνα όπως φαίνεται στις παρακάτω εικόνες.



**Εικόνα 56: Φορτίο Μάζας νασέλας και ρότορα.**

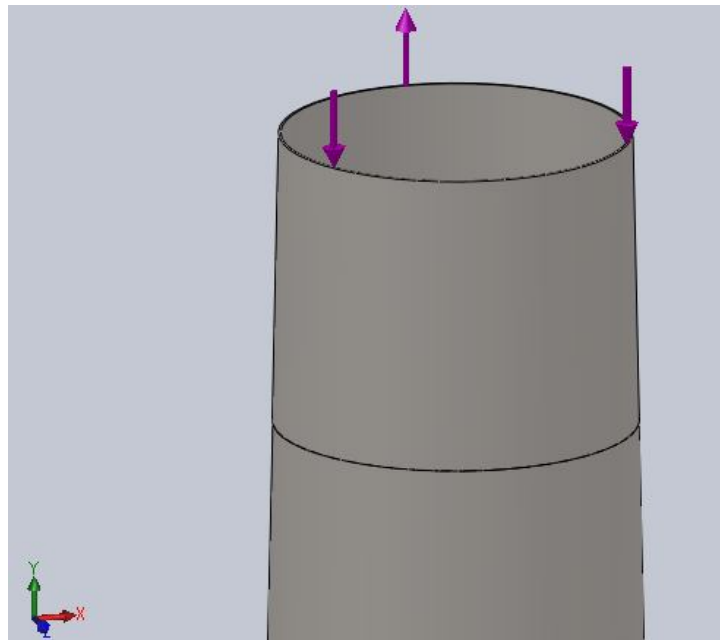


**Εικόνα 57: Η δύναμη της ώσης.**



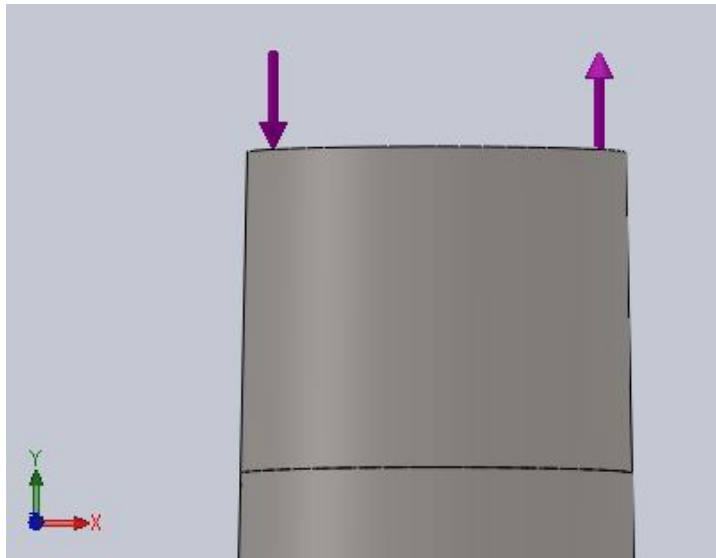
Εικόνα 58: Η οπισθέλκουσα δύναμη.

2. Για να δηλώσουμε στο πρόγραμμα τη ροπή πατάμε πάλι external loads και επιλέγουμε την εντολή torque η οποία είναι η ροπή και δηλώνουμε τα σημεία στα οποία ασκείται η ροπή όπως φαίνεται στις παρακάτω εικόνες.

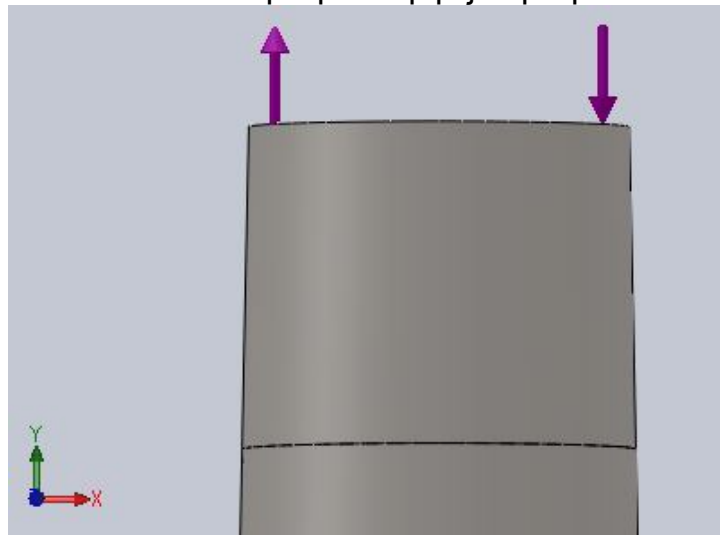


Εικόνα 59: Η ροπή του ρότορα





Εικόνα 60: Η ροπή από το βάρος του ρότορα



Εικόνα 61: Ροπή από το βάρος της νασέλας

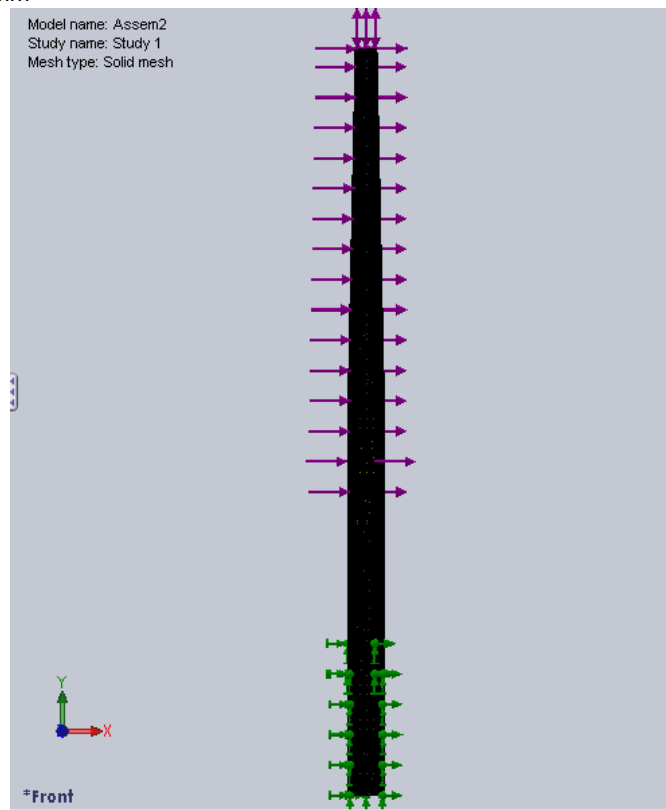
## 8.4. Παράμετροι διακριτοποίησης

Οι παράμετροι της διακριτοποίησης ποικίλουν στο πρόγραμμα solidworks οι οποίοι εξαρτώνται κυρίως από τη δυνατότητα του υπολογιστή και τη γεωμετρία του σχήματος όπως είναι στη συγκεκριμένη περίπτωση ο πυλώνας της ανεμογεννήτριας. Λόγο ότι το πρόγραμμα για να κάνει τις αναλύσεις χρησιμοποιεί τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων δημιουργούνται πάνω στο σχέδιο τριγωνικά σχήματα με ενδιάμεσους κόμβους όπως είναι στη παρακάτω εικόνα.

Για να γίνει η διακριτοποίηση επιλέγουμε το create mesh και εκεί καθαρίζουμε τους παραμέτρους για τη διακριτοποίηση. Στο mesh density επιλέγουμε το μέγεθος των τριγώνων με τους ενδιάμεσους κόμβους, όσο μικρότερο είναι το μέγεθος αυτό τόσο πιο μεγάλη ακρίβεια έχουμε στην ανάλυση, στο πυλώνα έχει γίνει η διακριτοποίηση με πολύ μικρό μέγεθος των τριγώνων για να έχουμε καλύτερη ακρίβεια στην ανάλυση. Μετά τη διαδικασία αυτή γίνεται η διακριτοποίηση του πυλώνα όπως φαίνεται στη παρακάτω εικόνα και ο πυλώνα είναι έτυμος για να γίνουν οι υπολογισμοί για την ανάλυση αντοχής.

Για τη διακριτοποίηση ελήφθησαν οι εξής παράμετροι:

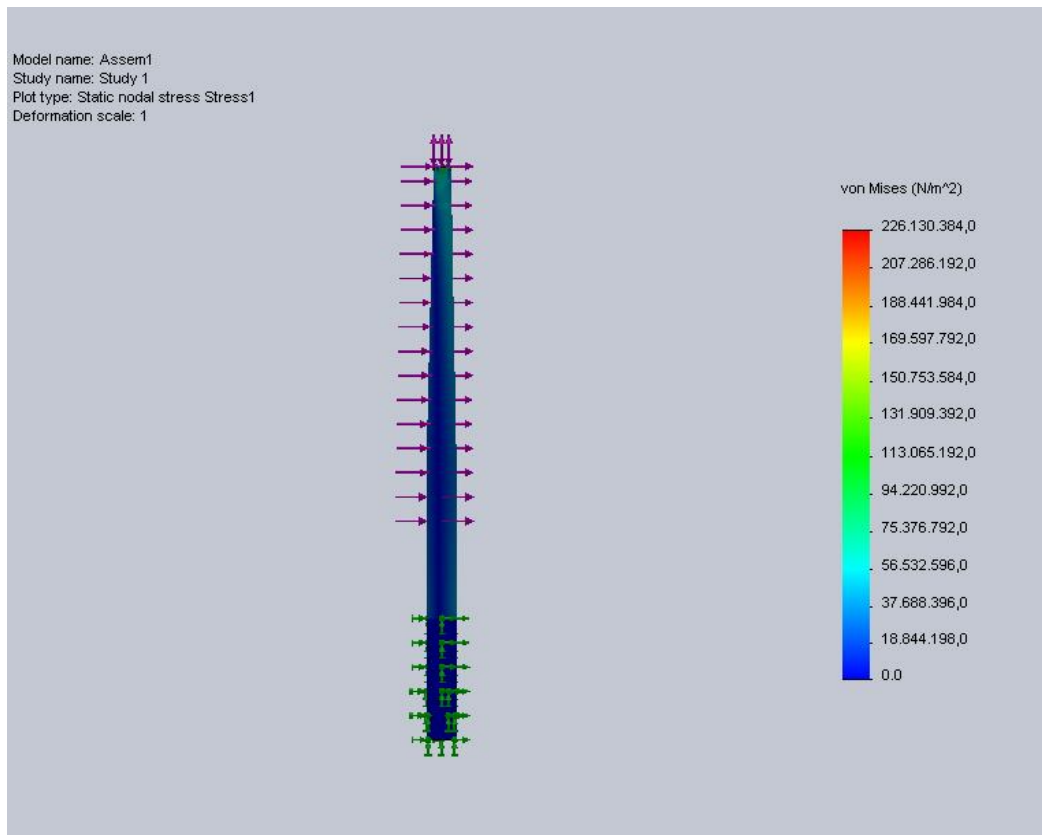
- 1) Για το μέγεθος των τριγώνων έχει ένα κέρσορα ο οποίος μπορείς να αυξομειώσεις το μέγεθος και είναι από το coarse μέχρι το fine, σε αυτή την ανάλυση έχει μπει ο κέρσορας στο Fine για να έχουμε καλύτερη ακρίβεια.
- 2) Στους παραμέτρους της διακριτοποίησης στο mesh parameters έχουν επιλεγεί στο global size=383,183 mm και στο tolerance=12,7728 mm



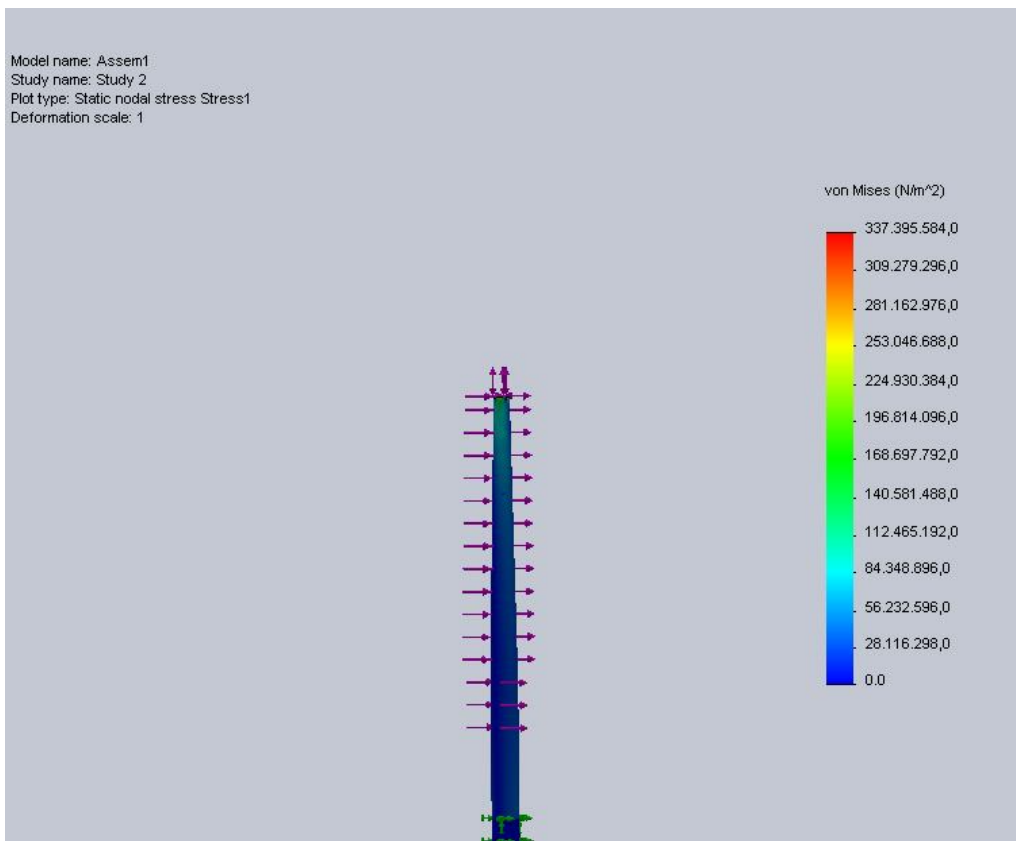
Εικόνα 62: Στην εικόνα αυτή φαίνεται η διακριτοποίηση

## 8.5. Υπολογισμός αντοχής του πυλώνα της ανεμογεννήτριας και αποτελέσματα

Αρχικά παίρνοντας τις φορτίσεις 1.1 και 1.6 τα αποτελέσματα που βγήκαν ήταν ότι η τάση κατά von Mises ήταν πάρα πολύ αυξημένη με αποτέλεσμα ο πυλώνας να θεωρηθεί ότι δεν αντέχει όπως φαίνεται και στις παρακάτω εικόνες.

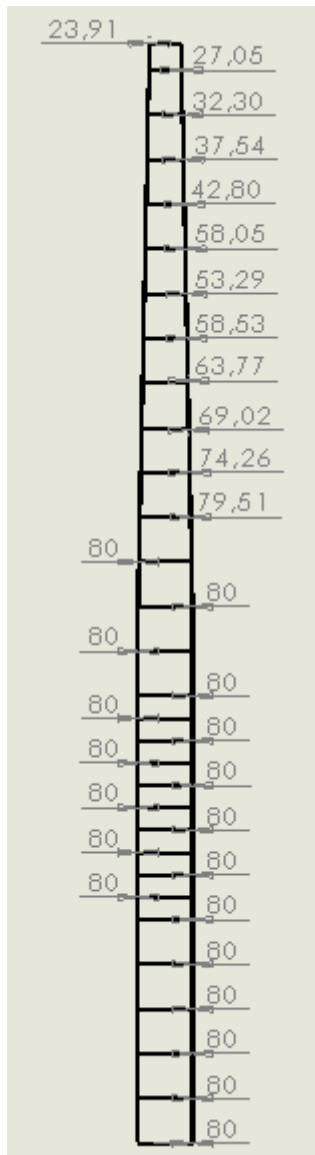


Εικόνα 63: Περίπτωση φόρτισης 1.1



**Εικόνα 64: Περίπτωση φόρτισης 1.6**

Η ισοδύναμη τάση κατά Von Mises στη 1.1 είναι 226 MPa και σύμφωνα με τον συντελεστή ασφαλείας του υλικού φαίνεται να αντέχει περίπου οριακά. Στην 1.6 όμως η τάση αυτή είναι στα 309 MPa η οποία ξεπερνά τον συντελεστή ασφαλείας του υλικού που έχει όριο τα 277 MPa. Αυξάνοντας όμως το πάχος του πυλώνα κατά 10 mm όπως φαίνεται και στο σχέδιο ( εικόνα 65 ) η ισοδύναμη τάση κατά Von Mises έφτασε μία ικανοποιητική τιμή όπως φαίνεται παρακάτω στις περιπτώσεις φορτίσεων του πυλώνα.



Εικόνα 65: Σχέδιο του πυλώνα με αλλαγμένο το πάχος.

## 1η ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΦΟΡΤΙΣΗΣ 1.1 Η ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑ ΣΕ ΚΑΝΟΝΙΚΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ

Οι καιρικές συνθήκες που χρησιμοποιήθηκαν κατά τον υπολογισμό είναι:

- Ταχύτητα ανέμου  $U_{\infty}=13,5$  m/s με φυσιολογική τύρβη ανέμου
- ύψος κύματος  $H_s=5.9$ m, φυσιολογική κατάσταση της θάλασσας
- πυκνότητα αέρα  $\rho_{air}=1.225$ kg/m<sup>3</sup>
- συντελεστής ώσης  $C_T=0,38$
- επιφάνεια σάρωσης  $A_r=12469$ m<sup>2</sup>
- η ανεμογεννήτρια παράγει ηλεκτρισμό
- ο συντελεστής φορτίου είναι  $1,25*1,2=1,5$

Οι δυνάμεις που ασκούνται στο πυλώνα είναι :

ΒΑΡΟΣ ΝΑΣΕΛΛΑΣ ΚΑΙ ΤΟΥ ΡΟΤΟΡΑ (N)	ΔΥΝΑΜΗ ΩΣΗΣ T (N)	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ ΕΠΙ T (N)	P (W)	ΔQ (Nm)	ΡΟΠΗ ΑΠΟ ΤΟ ΒΑΡΟΣ ΤΗΣ ΝΑΣΕΛΛΑΣ (Nm)	ΡΟΠΗ ΑΠΟ ΤΟ ΒΑΡΟΣ ΤΟΥ ΡΟΤΟΡΑ (Nm)
3,43E+06	5,29E+05	7,93E+05	1,07E+07	8,43E+06	4,47E+06	5,39E+06

Πίνακας 8: Οι δυνάμεις που ασκούνται στη κορυφή του πυλώνα.

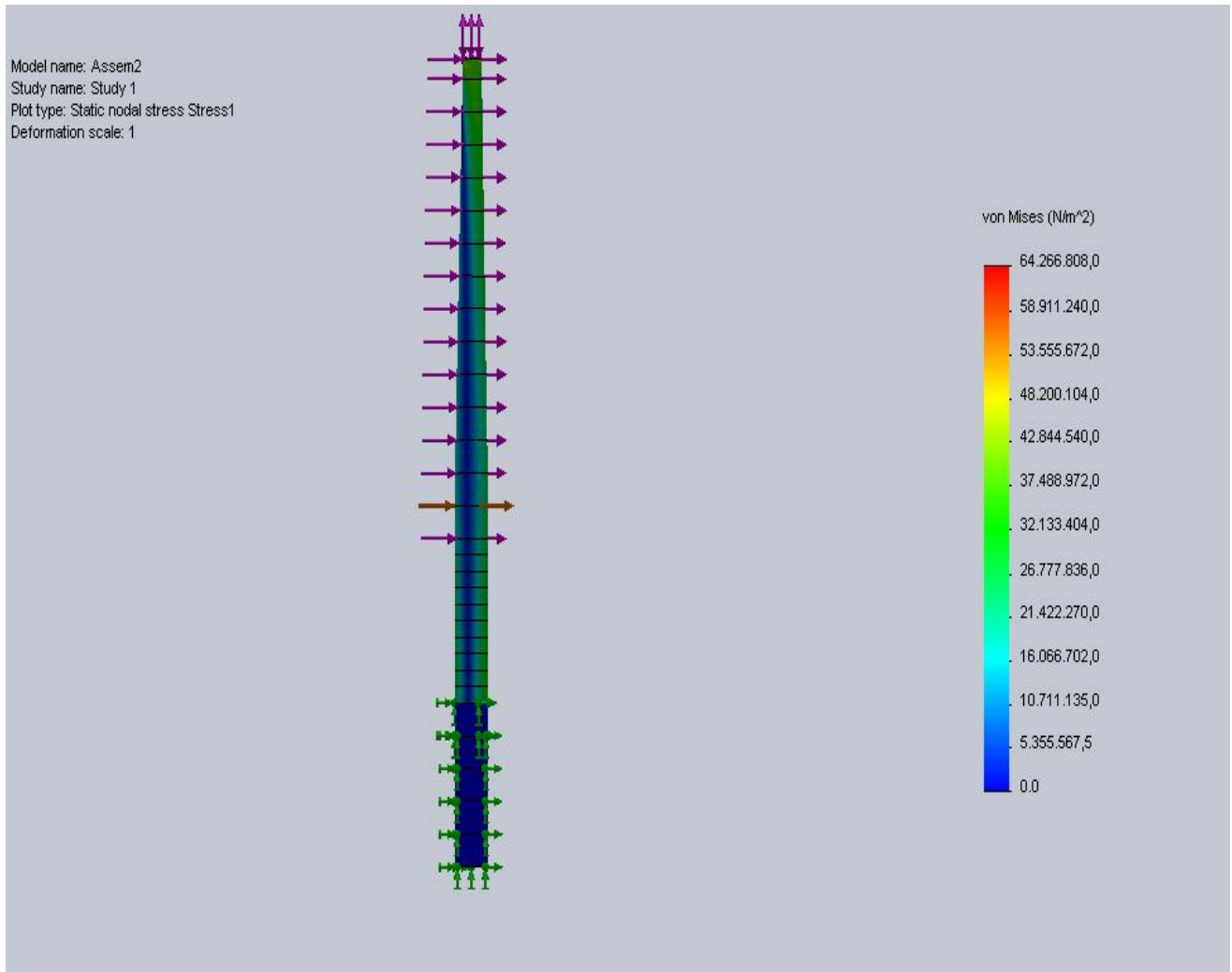
Η δύναμη της οπισθέλκουσας πάνω στο πυλώνα είναι στο παρακάτω πίνακα:

h2 (m)	h1 (m)	$\alpha$	Hh2 (m/s)	Uh1 (m/s)	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	A (m <sup>2</sup> )	$C_D$	D (N)	D ΕΠΙ ΤΟ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΦΟΡΤΙΟΥ
78	5	0,08	13,5	10,84	1,5	1,225	30,80	0,70	<b>1265,86</b>	1898,79
78	10	0,08	13,5	11,45	1,5	1,225	30,80	0,70	<b>1414,33</b>	2121,50
78	15	0,08	13,5	11,83	1,5	1,225	30,80	0,70	<b>1509,13</b>	2263,69
78	20	0,08	13,5	12,11	1,5	1,225	29,50	0,70	<b>1513,72</b>	2270,58
78	25	0,08	13,5	12,33	1,5	1,225	28,51	0,70	<b>1516,00</b>	2274,00
78	30	0,08	13,5	12,51	1,5	1,225	27,52	0,70	<b>1506,57</b>	2259,85
78	35	0,08	13,5	12,66	1,5	1,225	26,53	0,70	<b>1488,52</b>	2232,79
78	40	0,08	13,5	12,80	1,5	1,225	25,54	0,70	<b>1463,80</b>	2195,70
78	45	0,08	13,5	12,92	1,5	1,225	24,54	0,70	<b>1433,68</b>	2150,52
78	50	0,08	13,5	13,03	1,5	1,225	23,55	0,70	<b>1399,12</b>	2098,68
78	55	0,08	13,5	13,13	1,5	1,225	22,56	0,70	<b>1360,78</b>	2041,17
78	60	0,08	13,5	13,22	1,5	1,225	21,57	0,70	<b>1319,07</b>	1978,61
78	65	0,08	13,5	13,30	1,5	1,225	20,58	0,70	<b>1274,73</b>	1912,09
78	70	0,08	13,5	13,38	1,5	1,225	19,58	0,70	<b>1227,74</b>	1841,60
78	75	0,08	13,5	13,46	1,5	1,225	18,59	0,70	<b>1178,48</b>	1767,71
78	80	0,08	13,5	13,53	1,5	1,225	16,40	0,70	<b>1050,67</b>	1576,00

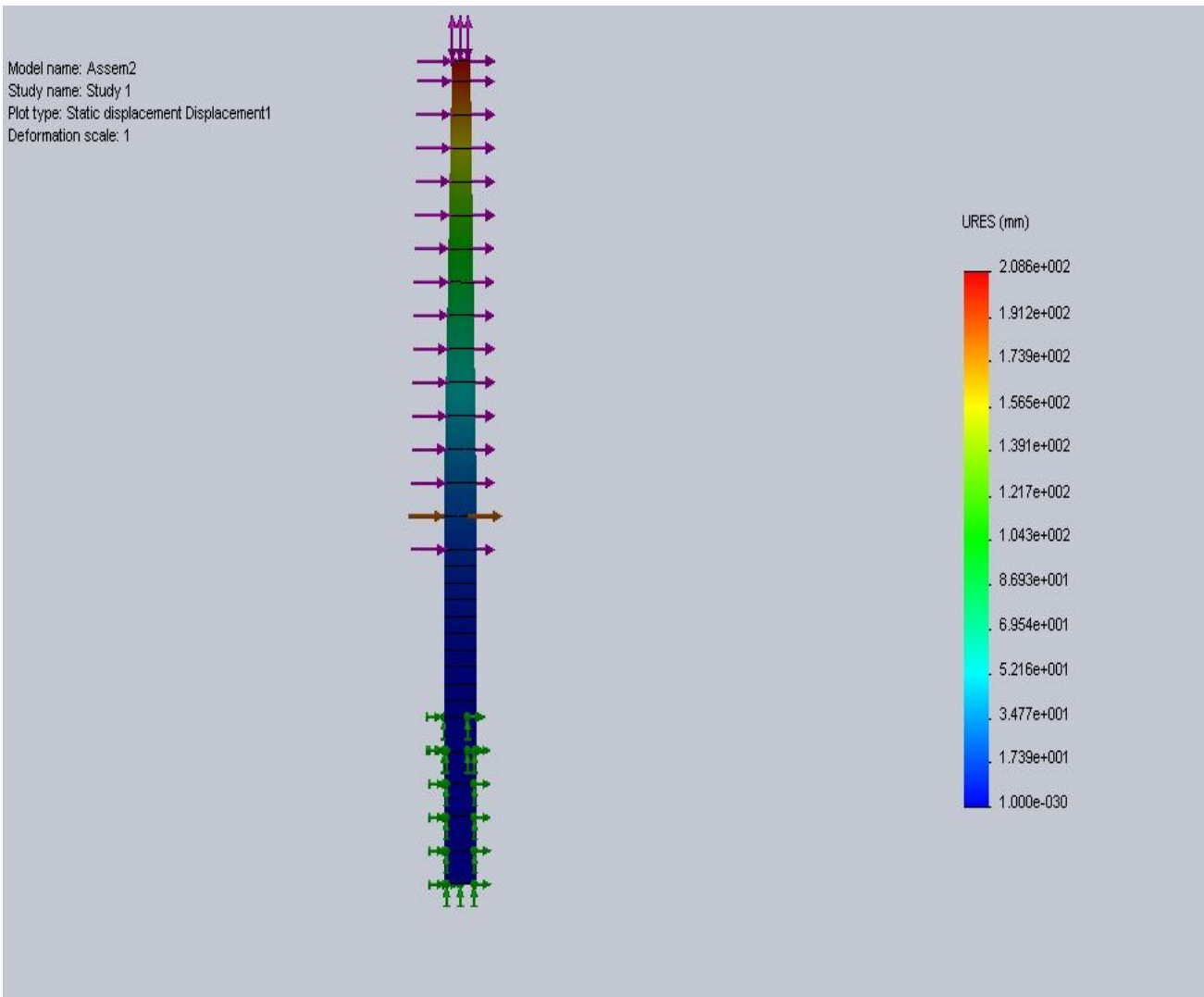
Πίνακας 9: Η δύναμη της οπισθέλκουσας.

Τα υδροδυναμικά φορτία υπολογίστηκαν από το πρόγραμμα solidworks και ελήφθησαν υπόψιν απευθείας στον υπολογισμό.

#### ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ:



Εικόνα 66: Εδώ φαίνεται μέγιστη ισοδύναμη τάση κατά Von Mises.



Εικόνα 67: Εδώ φαίνεται η μετατόπιση του πυλώνα.

A/A	ΕΛΑΧΙΣΤΗ	ΜΕΓΙΣΤΗ
Η ισοδύναμη τάση κατά Von Mises (N/m <sup>2</sup> )	3.01402E-010	6.42668E+007
Μετατόπιση (mm)	0	208,633

Πίνακας 10: Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων για περίπτωση φόρτισης 1.1



## 2η ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΦΟΡΤΙΣΗΣ 1.4 Η ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑ ΣΕ ΚΑΝΟΝΙΚΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ

Οι καιρικές συνθήκες που χρησιμοποιήθηκαν κατά τον υπολογισμό είναι:

- Ταχύτητα ανέμου  $U_{\infty}=15,5$  m/s με ακραία ριπή ανέμου,
- ύψος κύματος  $H_s=5.9$ m, φυσιολογική κατάσταση της θάλασσας,
- πυκνότητα αέρα  $\rho_{air}=1.225$ kg/m<sup>3</sup>
- συντελεστής ώσης  $C_T=0,24$
- επιφάνεια σάρωσης  $A_r=12469$ m<sup>2</sup>
- η ανεμογεννήτρια παράγει ηλεκτρισμό
- ο συντελεστής φορτίου είναι 1,35

Οι δυνάμεις που ασκούνται στο πυλώνα είναι :

ΒΑΡΟΣ ΝΑΣΕΛΛΑΣ ΚΑΙ ΤΟΥ ΡΟΤΟΡΑ (N)	ΔΥΝΑΜΗ ΩΣΗΣ T (N)	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ ΕΠΙ T (N)	P (W)	ΔQ (Nm)	ΡΟΠΗ ΑΠΟ ΤΟ ΒΑΡΟΣ ΤΗΣ ΝΑΣΕΛΛΑΣ (Nm)	ΡΟΠΗ ΑΠΟ ΤΟ ΒΑΡΟΣ ΤΟΥ ΡΟΤΟΡΑ (Nm)
3,43E+06	4,40E+05	5,94E+05	9,21E+06	7,26E+06	4,47E+06	5,39E+06

Πίνακας 11:Οι δυνάμεις που ασκούνται στη κορυφή του πυλώνα.

Η δύναμη της οπισθέλκουσας πάνω στο πυλώνα είναι στο παρακάτω πίνακα:

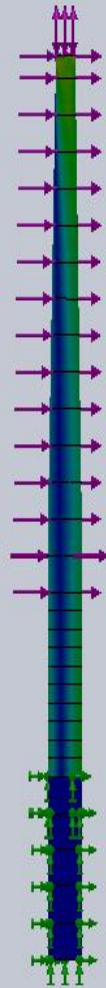
h2 (m)	h1 (m)	$\alpha$	Hh2 (m/s)	Uh1 (m/s)	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	A (m <sup>2</sup> )	$C_D$	D (N)	D ΕΠΙ ΤΟ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΦΟΡΤΙΟΥ
78	5	0,08	15,5	12,44	1,35	1,225	30,80	0,70	<b>2044,18</b>	2759,64
78	10	0,08	15,5	13,15	1,35	1,225	30,80	0,70	<b>2283,93</b>	3083,31
78	15	0,08	15,5	13,58	1,35	1,225	30,80	0,70	<b>2437,01</b>	3289,97
78	20	0,08	15,5	13,90	1,35	1,225	29,50	0,70	<b>2444,43</b>	3299,98
78	25	0,08	15,5	14,15	1,35	1,225	28,51	0,70	<b>2448,11</b>	3304,95
78	30	0,08	15,5	14,36	1,35	1,225	27,52	0,70	<b>2432,88</b>	3284,38
78	35	0,08	15,5	14,54	1,35	1,225	26,53	0,70	<b>2403,74</b>	3245,05
78	40	0,08	15,5	14,69	1,35	1,225	25,54	0,70	<b>2363,81</b>	3191,14
78	45	0,08	15,5	14,83	1,35	1,225	24,54	0,70	<b>2315,18</b>	3125,50
78	50	0,08	15,5	14,96	1,35	1,225	23,55	0,70	<b>2259,36</b>	3050,14
78	55	0,08	15,5	15,07	1,35	1,225	22,56	0,70	<b>2197,45</b>	2966,56
78	60	0,08	15,5	15,18	1,35	1,225	21,57	0,70	<b>2130,10</b>	2875,64
78	65	0,08	15,5	15,28	1,35	1,225	20,58	0,70	<b>2058,49</b>	2778,96
78	70	0,08	15,5	15,37	1,35	1,225	19,58	0,70	<b>1982,61</b>	2676,52
78	75	0,08	15,5	15,45	1,35	1,225	18,59	0,70	<b>1903,06</b>	2569,13
78	80	0,08	15,5	15,53	1,35	1,225	16,40	0,70	<b>1696,67</b>	2290,50

Πίνακας 12: Η δύναμη της οπισθέλκουσας.

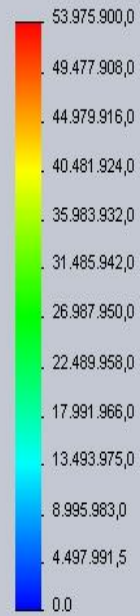
Τα υδροδυναμικά φορτία υπολογίστηκαν από το πρόγραμμα solidworks και ελήφθησαν υπόψιν απευθείας στον υπολογισμό.

**ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ:**

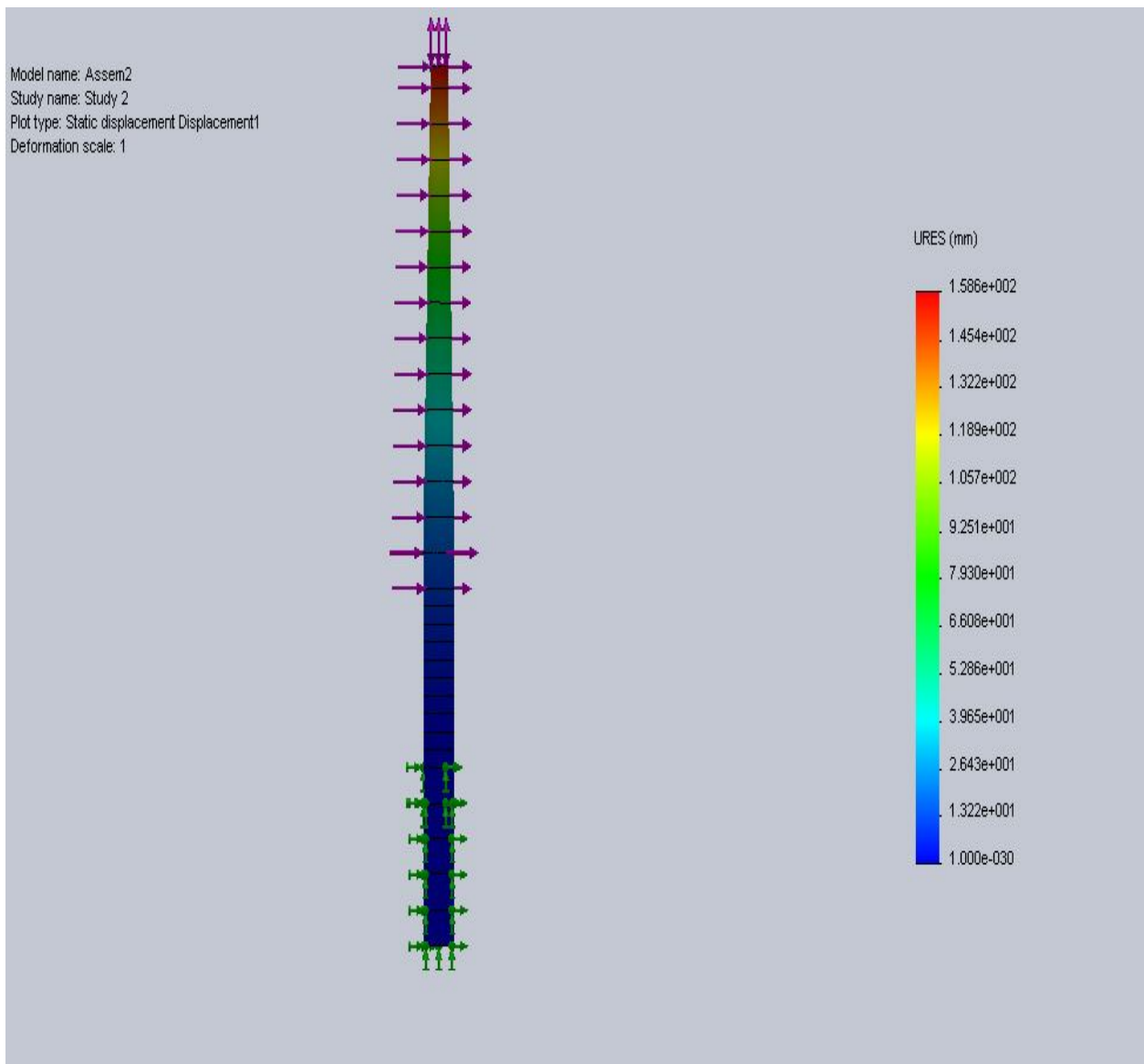
Model name: Assem2  
Study name: Study 2  
Plot type: Static nodal stress Stress1  
Deformation scale: 1



von Mises (N/m<sup>2</sup>)



**Εικόνα 68: Εδώ φαίνεται η μέγιστη ισοδύναμη τάση κατά Von Mises.**



Εικόνα 69: Εδώ φαίνεται η μετατόπιση του πυλώνα.

A/A	ΕΛΑΧΙΣΤΗ	ΜΕΓΙΣΤΗ
Η ισοδύναμη τάση κατά Von Mises (N/m <sup>2</sup> )	2.40897E-011	5.39759E+007
Μετατόπιση (mm)	0	158,593

Πίνακας 13: Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων για περίπτωση φόρτισης 1.4

### 3η ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΦΟΡΤΙΣΗΣ 1.5 Η ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑ ΣΕ ΚΑΝΟΝΙΚΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ

Οι καιρικές συνθήκες που ελήφθησαν κατά τον υπολογισμό είναι:

- Ταχύτητα ανέμου  $U_{\infty}=13,5$  m/s με ακραίο διατημητικός άνεμο, (παρουσιάζεις μεγάλες αλλαγές σε ταχύτητα και κατεύθυνση σε σύντομο χρονικό διάστημα)
- ύψος κύματος  $H_s=1.6$ m φυσιολογική κατάσταση της θάλασσας,
- πυκνότητα αέρα  $\rho_{air}=1.225$ kg/m<sup>3</sup>
- συντελεστής ώσης  $C_T=0,38$
- επιφάνια που διαγράφουν τα φτερά  $A_r=12469$ m<sup>2</sup>
- Η ανεμογεννήτρια βρίσκεται σε λειτουργία και περιστρέφεται η νασέλα λόγω της μεταβολής τις κατεύθυνσης του ανέμου και μεταβάλλονται και οι στροφές του ρότορα λόγω της μεταβολής της ταχύτητας του ανέμου .
- Ο συντελεστής φορτίου είναι 1,35

Οι δυνάμεις που ασκούνται στο πυλώνα είναι :

ΒΑΡΟΣ ΝΑΣΕΛΛΑΣ ΚΑΙ ΤΟΥ ΡΟΤΟΡΑ (N)	ΔΥΝΑΜΗ ΩΣΗΣ T (N)	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ ΕΠΙ T (N)	P (W)	ΔQ (Nm)	ΡΟΠΗ ΑΠΟ ΤΟ ΒΑΡΟΣ ΤΗΣ ΝΑΣΕΛΛΑΣ (Nm)	ΡΟΠΗ ΑΠΟ ΤΟ ΒΑΡΟΣ ΤΟΥ ΡΟΤΟΡΑ (Nm)
3,43E+06	5,29E+05	7,14E+05	9,64E+06	7,59E+06	4,47E+06	5,39E+06

Πίνακας 14: Οι δυνάμεις που ασκούνται στη κορυφή του πυλώνα.

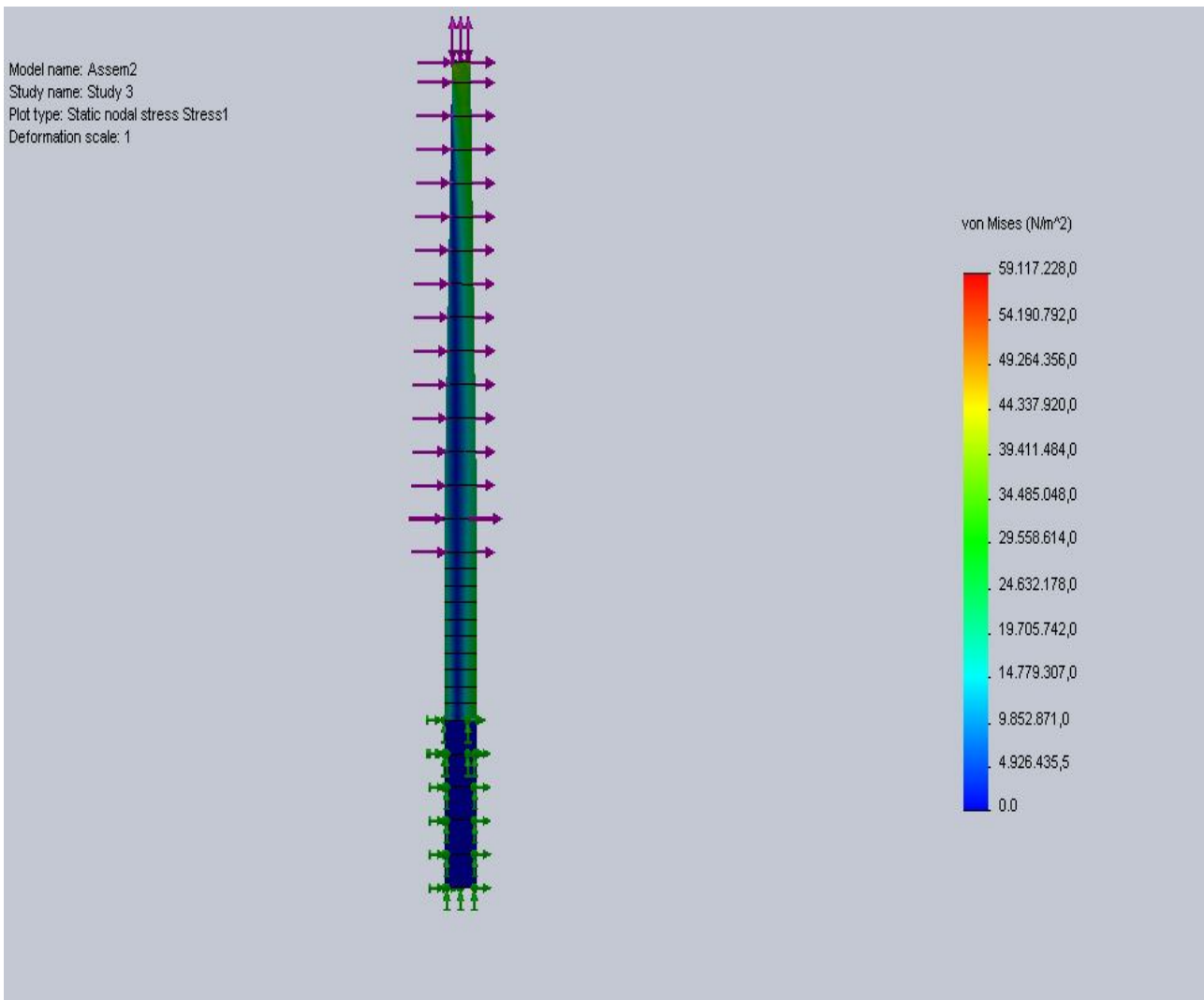
Η δύναμη της οπισθέλκουσας πάνω στο πυλώνα είναι στο παρακάτω πίνακα:

h2 (m)	h1 (m)	$\alpha$	Hh2 (m/s)	Uh1 (m/s)	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	A (m <sup>2</sup> )	$C_D$	D (N)	D ΕΠΙ ΤΟ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΦΟΡΤΙΟΥ
78	5	0,08	13,5	10,84	1,35	1,225	30,80	0,70	<b>1550,68</b>	2093,42
78	10	0,08	13,5	11,45	1,35	1,225	30,80	0,70	<b>1732,56</b>	2338,95
78	15	0,08	13,5	11,83	1,35	1,225	30,80	0,70	<b>1848,68</b>	2495,72
78	20	0,08	13,5	12,11	1,35	1,225	29,50	0,70	<b>1854,31</b>	2503,32
78	25	0,08	13,5	12,33	1,35	1,225	28,51	0,70	<b>1857,10</b>	2507,08
78	30	0,08	13,5	12,51	1,35	1,225	27,52	0,70	<b>1845,54</b>	2491,48
78	35	0,08	13,5	12,66	1,35	1,225	26,53	0,70	<b>1823,44</b>	2461,65
78	40	0,08	13,5	12,80	1,35	1,225	25,54	0,70	<b>1793,15</b>	2420,75
78	45	0,08	13,5	12,92	1,35	1,225	24,54	0,70	<b>1756,26</b>	2370,95
78	50	0,08	13,5	13,03	1,35	1,225	23,55	0,70	<b>1713,92</b>	2313,79
78	55	0,08	13,5	13,13	1,35	1,225	22,56	0,70	<b>1666,96</b>	2250,39
78	60	0,08	13,5	13,22	1,35	1,225	21,57	0,70	<b>1615,86</b>	2181,41
78	65	0,08	13,5	13,30	1,35	1,225	20,58	0,70	<b>1561,54</b>	2108,08
78	70	0,08	13,5	13,38	1,35	1,225	19,58	0,70	<b>1503,98</b>	2030,37
78	75	0,08	13,5	13,46	1,35	1,225	18,59	0,70	<b>1443,63</b>	1948,90
78	80	0,08	13,5	13,53	1,35	1,225	16,40	0,70	<b>1287,07</b>	1737,54

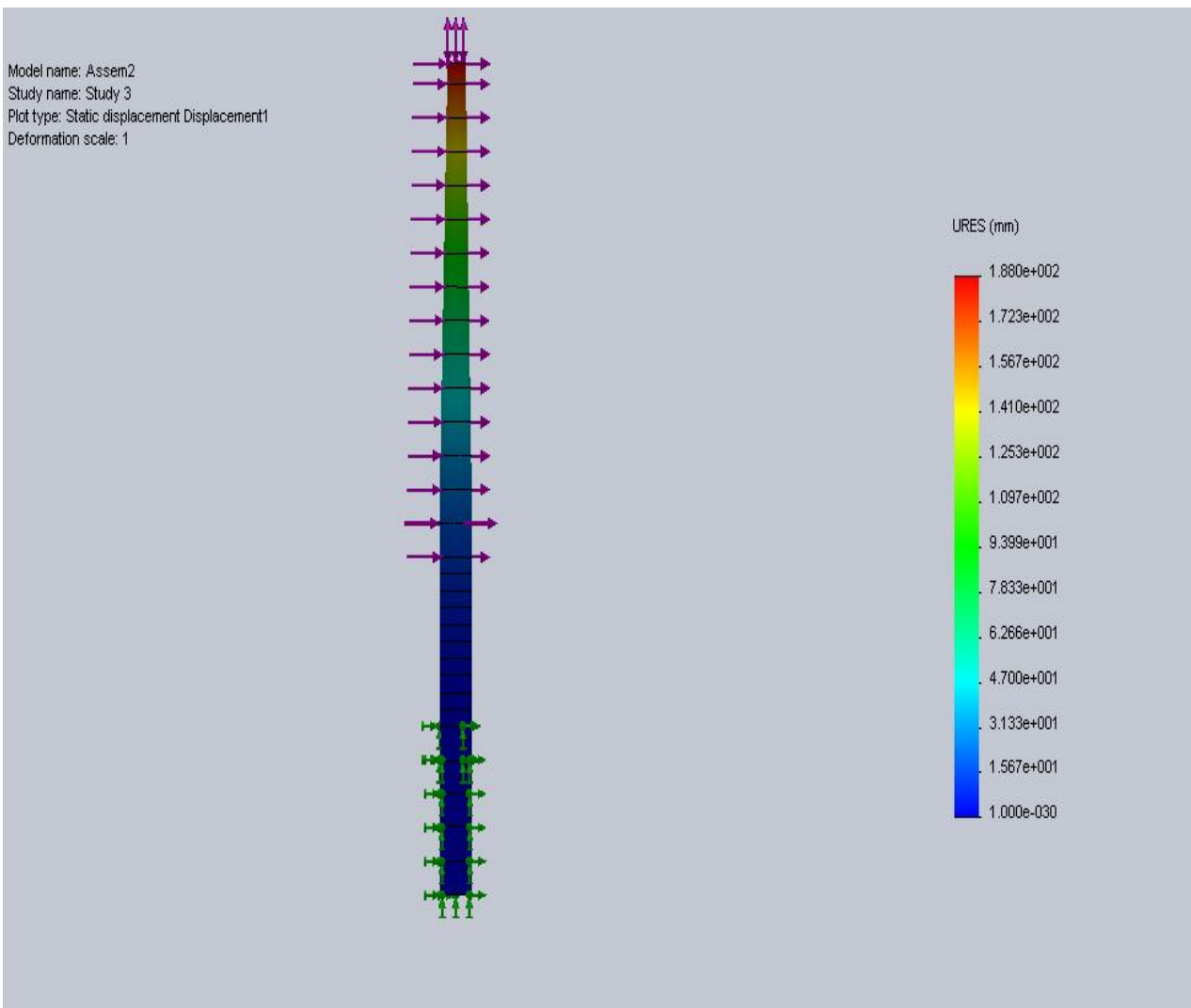
Πίνακας 15: Η δύναμη της οπισθέλκουσας.

Τα υδροδυναμικά φορτία υπολογίστηκαν από το πρόγραμμα solidworks και ελήφθησαν υπόψιν απευθείας στον υπολογισμό.

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ:



Εικόνα 70: Εδώ φαίνεται η μέγιστη ισοδύναμη τάση κατά Von Mises.



Εικόνα 71: Εδώ φαίνεται η μετατόπιση του πυλώνα.

A/A	ΕΛΑΧΙΣΤΗ	ΜΕΓΙΣΤΗ
Η ισοδύναμη τάση κατά Von Mises (N/m <sup>2</sup> )	7.56248E-011	5.91172E+007
Μετατόπιση (mm)	0	187,984

Πίνακας 16: Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων για περίπτωση φόρτισης 1.5

#### 4η ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΦΟΡΤΙΣΗΣ 1.6 Η ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑ ΣΕ ΚΑΝΟΝΙΚΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ

Οι καιρικές συνθήκες που ελήφθησαν κατά τον υπολογισμό είναι

- Ταχύτητα ανέμου  $U_{\infty}=25$  m/s με φυσιολογική τυρβώδης ροή ανέμου
- ύψος κύματος  $H_s=15.04$ m φυσιολογική κατάσταση της θάλασσας
- πυκνότητα αέρα  $\rho_{air}=1.225$ kg/m<sup>3</sup>
- συντελεστής ώσης  $C_T=0.08$
- επιφάνια που διαγράφουν τα φτερά  $A_f=12469$ m<sup>2</sup>
- Η ανεμογεννήτρια παράγει ηλεκτρισμό.
- Ο συντελεστής φορτίου είναι 1,35

Οι δυνάμεις που ασκούνται στο πυλώνα είναι :

ΒΑΡΟΣ ΝΑΣΕΛΛΑΣ ΚΑΙ ΤΟΥ ΡΟΤΟΡΑ (N)	ΔΥΝΑΜΗ ΩΣΗΣ T (N)	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ ΕΠΙ T (N)	P (W)	ΔQ (Nm)	ΡΟΠΗ ΑΠΟ ΤΟ ΒΑΡΟΣ ΤΗΣ ΝΑΣΕΛΛΑΣ (Nm)	ΡΟΠΗ ΑΠΟ ΤΟ ΒΑΡΟΣ ΤΟΥ ΡΟΤΟΡΑ (Nm)
3,43E+06	3,82E+05	5,16E+05	1,29E+07	1,01E+07	4,47E+06	5,39E+06

Πίνακας 17: Οι δυνάμεις που ασκούνται στη κορυφή του πυλώνα.

Η δύναμη της οπισθέλκουσας πάνω στο πυλώνα είναι στο παρακάτω πίνακα:

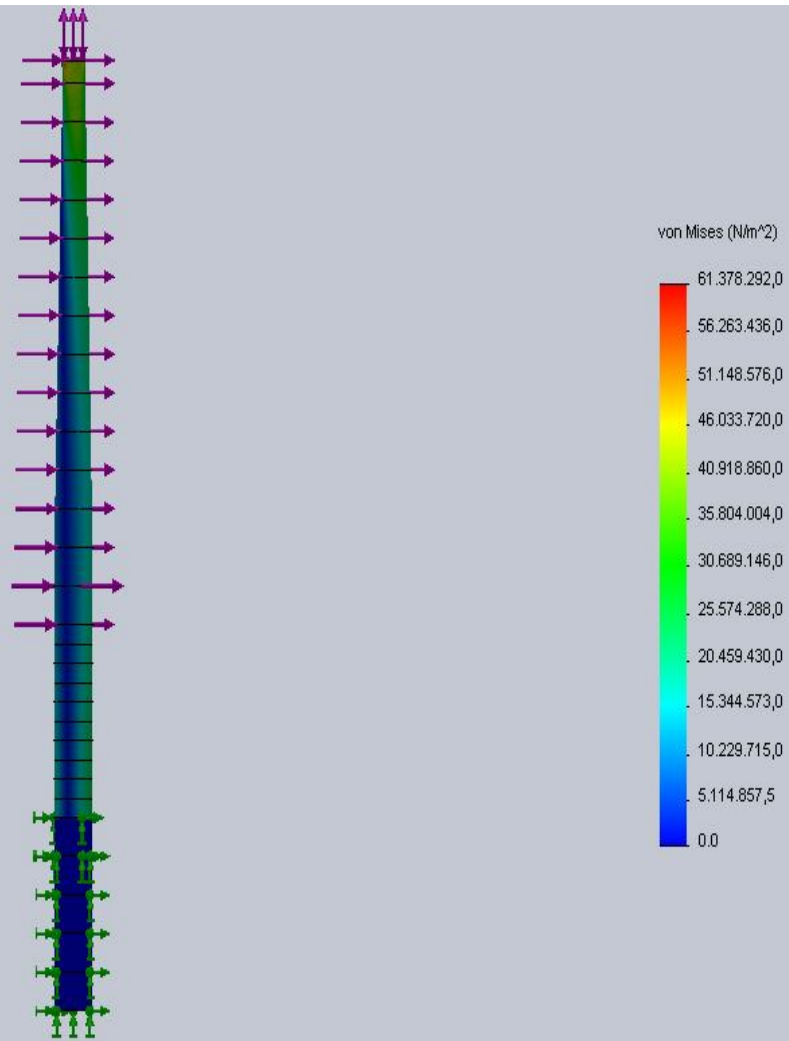
h2	h1	α	Hh2	Uh1	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ	ρ (kg/m <sup>3</sup> )	A (m <sup>2</sup> )	C <sub>D</sub>	D (N)	D ΕΠΙ ΤΟ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΦΟΡΤΙΟΥ(N)
78	5	0,08	25	20,07	1,35	1,225	30,80	0,70	<b>5317,84</b>	7179,08
78	10	0,08	25	21,21	1,35	1,225	30,80	0,70	<b>5941,55</b>	8021,09
78	15	0,08	25	21,91	1,35	1,225	30,80	0,70	<b>6339,78</b>	8558,71
78	20	0,08	25	22,42	1,35	1,225	29,50	0,70	<b>6359,09</b>	8584,77
78	25	0,08	25	22,82	1,35	1,225	28,51	0,70	<b>6368,65</b>	8597,67
78	30	0,08	25	23,16	1,35	1,225	27,52	0,70	<b>6329,03</b>	8544,18
78	35	0,08	25	23,45	1,35	1,225	26,53	0,70	<b>6253,23</b>	8441,86
78	40	0,08	25	23,70	1,35	1,225	25,54	0,70	<b>6149,35</b>	8301,63
78	45	0,08	25	23,92	1,35	1,225	24,54	0,70	<b>6022,85</b>	8130,84
78	50	0,08	25	24,13	1,35	1,225	23,55	0,70	<b>5877,64</b>	7934,81
78	55	0,08	25	24,31	1,35	1,225	22,56	0,70	<b>5716,58</b>	7717,39
78	60	0,08	25	24,48	1,35	1,225	21,57	0,70	<b>5541,37</b>	7480,84
78	65	0,08	25	24,64	1,35	1,225	20,58	0,70	<b>5355,07</b>	7229,35
78	70	0,08	25	24,78	1,35	1,225	19,58	0,70	<b>5157,67</b>	6962,86
78	75	0,08	25	24,92	1,35	1,225	18,59	0,70	<b>4950,73</b>	6683,48
78	80	0,08	25	25,05	1,35	1,225	16,40	0,70	<b>4413,81</b>	5958,65

Πίνακας 18: Η δύναμη της οπισθέλκουσας.

Τα υδροδυναμικά φορτία υπολογίστηκαν από το πρόγραμμα solidworks και ελήφθησαν υπόψιν απευθείας στον υπολογισμό.

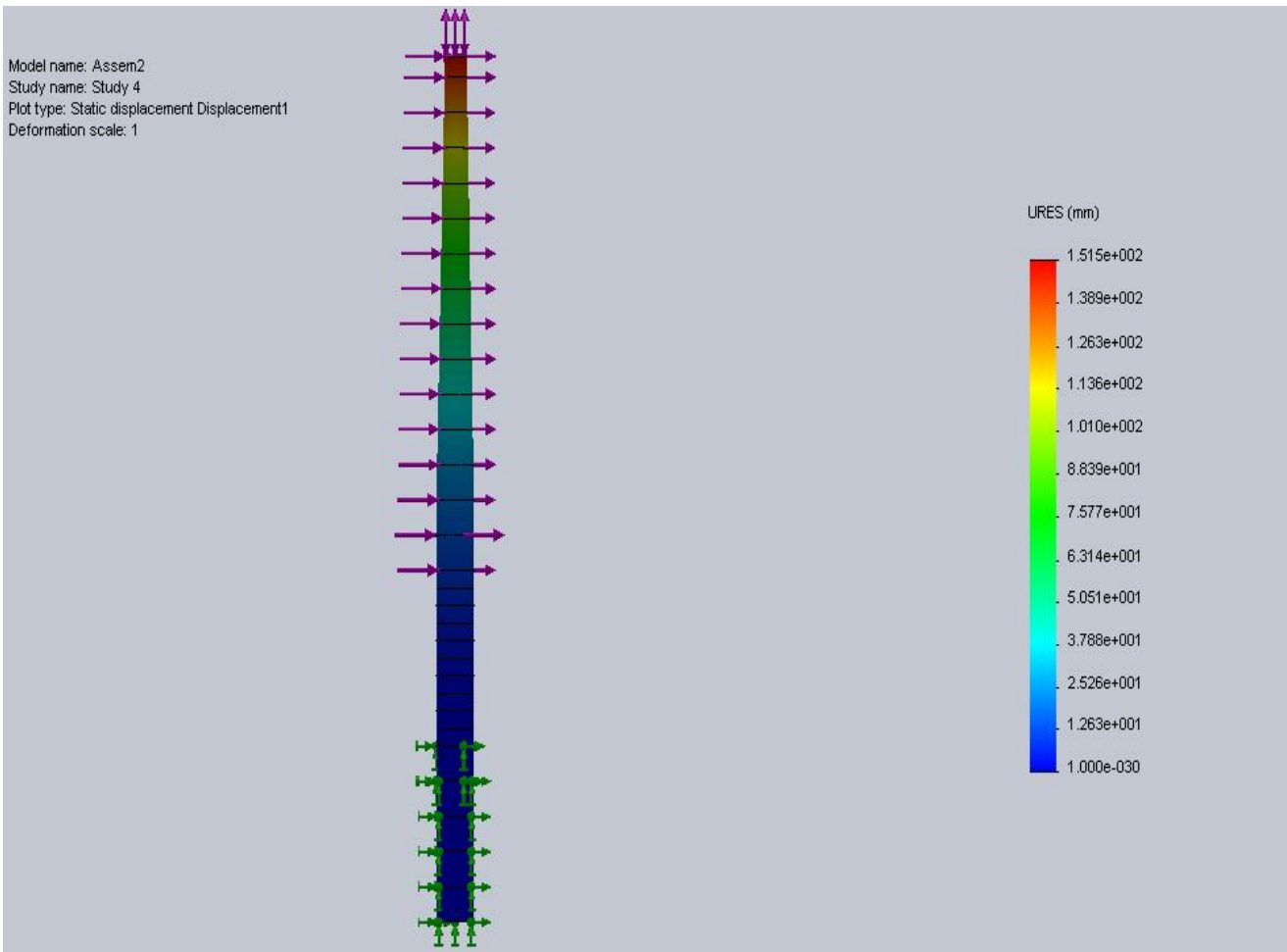
**ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ:**

Model name: Assem2  
Study name: Study 4  
Plot type: Static nodal stress Stress1  
Deformation scale: 1



**Εικόνα 72: Εδώ φαίνεται η μέγιστη ισοδύναμη τάση κατά Von Mises.**





Εικόνα 73: Εδώ φαίνεται η μετατόπιση του πυλώνα.

A/A	ΕΛΑΧΙΣΤΗ	ΜΕΓΙΣΤΗ
Η ισοδύναμη τάση κατά Von Mises (N/m <sup>2</sup> )	1.7532E-011	6.13783E+007
Μετατόπιση (mm)	0	151,532

Πίνακας 19: Συγκενρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων για περίπτωση φόρτισης 1.6

## 5η ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΦΟΡΤΙΣΗΣ 2.1 Η ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑ ΠΑΡΑΓΕΙ ΗΛΕΚΤΡΙΣΜΟ ΚΑΙ ΕΜΦΑΝΙΖΕΙ ΒΛΑΒΗ.

Οι καιρικές συνθήκες που ελήφθησαν κατά τον υπολογισμό είναι:

- Ταχύτητα ανέμου  $U_{\infty}=13,5$  m/s με φυσιολογική τυρβώδης ροή ανέμου
- ύψος κύματος  $H_s=5.9$ m με φυσιολογική κατάσταση της θάλασσας
- πυκνότητα αέρα  $\rho_{air}=1.225$ kg/m<sup>3</sup>
- συντελεστής ώσης  $C_T=0,38$
- επιφάνια που διαγράφουν τα φτερά  $A_r=12469$ m<sup>2</sup>
- Η ανεμογεννήτρια παράγει ηλεκτρισμό και παρουσιάζει βλάβη.
- Ο συντελεστής φορτίου είναι 1,35

Οι δυνάμεις που ασκούνται στο πυλώνα είναι :

ΒΑΡΟΣ ΝΑΣΕΛΛΑΣ ΚΑΙ ΤΟΥ ΡΟΤΟΡΑ (N)	ΔΥΝΑΜΗ ΩΣΗΣ T (N)	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ ΕΠΙ T (N)	P (W)	ΔQ (Nm)	ΡΟΠΗ ΑΠΟ ΤΟ ΒΑΡΟΣ ΤΗΣ ΝΑΣΕΛΛΑΣ (Nm)	ΡΟΠΗ ΑΠΟ ΤΟ ΒΑΡΟΣ ΤΟΥ ΡΟΤΟΡΑ (Nm)
3,43E+06	5,29E+05	7,14E+05	9,64E+06	7,59E+06	4,47E+06	5,39E+06

**Πίνακας 20 :Οι δυνάμεις που ασκούνται στη κορυφή του πυλώνα.**

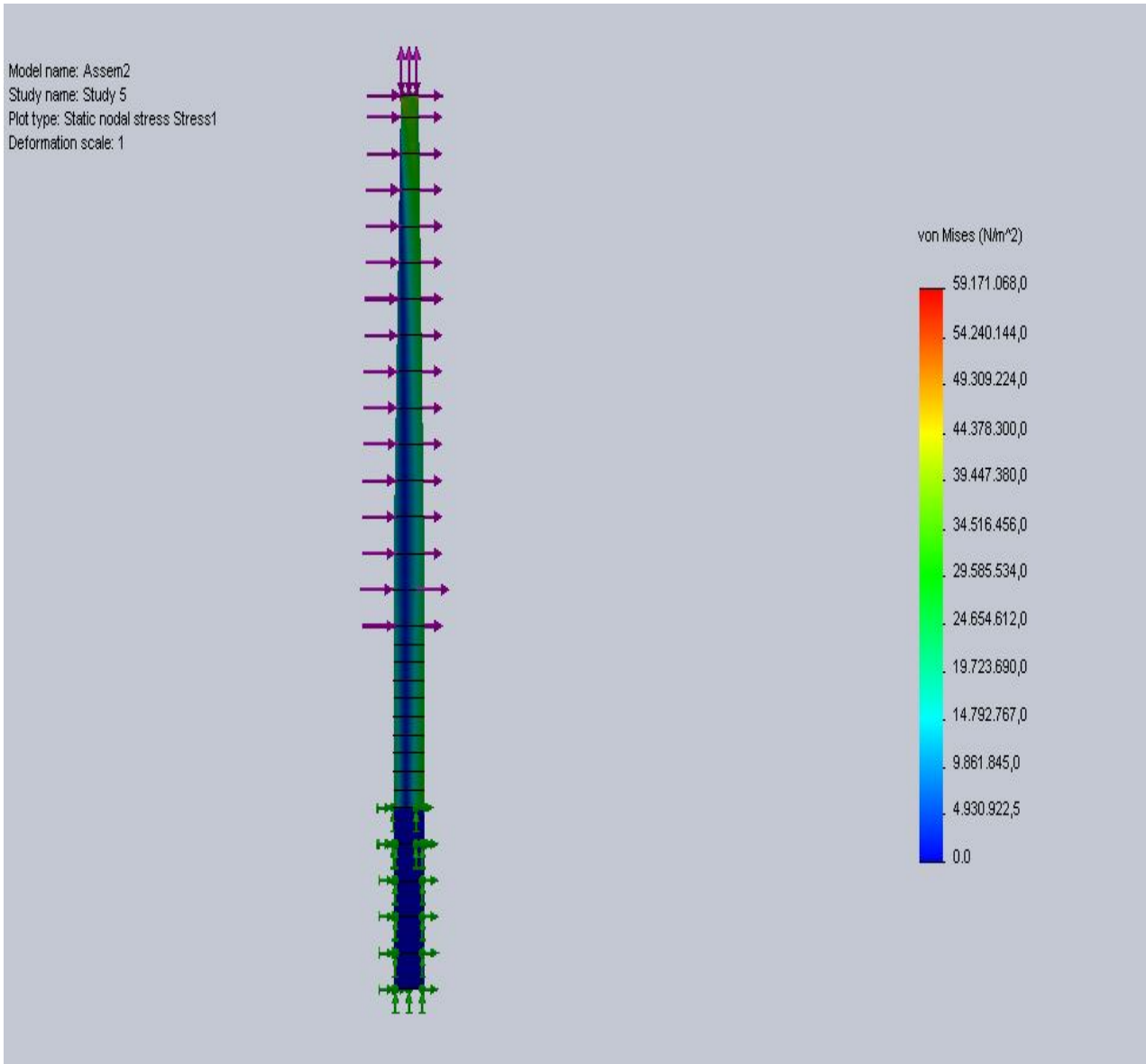
Η δύναμη της οπισθέλκουσας πάνω στο πυλώνα είναι στο παρακάτω πίνακα:

h2 (m)	h1 (m)	$\alpha$	Hh2 (m/s)	Uh1 (m/s)	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	A (m <sup>2</sup> )	$C_D$	D (N)	D ΕΠΙ ΤΟ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΦΟΡΤΙΟΥ
78	5	0,08	13,5	10,84	1,35	1,225	30,80	0,70	<b>1550,68</b>	2093,42
78	10	0,08	13,5	11,45	1,35	1,225	30,80	0,70	<b>1732,56</b>	2338,95
78	15	0,08	13,5	11,83	1,35	1,225	30,80	0,70	<b>1848,68</b>	2495,72
78	20	0,08	13,5	12,11	1,35	1,225	29,50	0,70	<b>1854,31</b>	2503,32
78	25	0,08	13,5	12,33	1,35	1,225	28,51	0,70	<b>1857,10</b>	2507,08
78	30	0,08	13,5	12,51	1,35	1,225	27,52	0,70	<b>1845,54</b>	2491,48
78	35	0,08	13,5	12,66	1,35	1,225	26,53	0,70	<b>1823,44</b>	2461,65
78	40	0,08	13,5	12,80	1,35	1,225	25,54	0,70	<b>1793,15</b>	2420,75
78	45	0,08	13,5	12,92	1,35	1,225	24,54	0,70	<b>1756,26</b>	2370,95
78	50	0,08	13,5	13,03	1,35	1,225	23,55	0,70	<b>1713,92</b>	2313,79
78	55	0,08	13,5	13,13	1,35	1,225	22,56	0,70	<b>1666,96</b>	2250,39
78	60	0,08	13,5	13,22	1,35	1,225	21,57	0,70	<b>1615,86</b>	2181,41
78	65	0,08	13,5	13,30	1,35	1,225	20,58	0,70	<b>1561,54</b>	2108,08
78	70	0,08	13,5	13,38	1,35	1,225	19,58	0,70	<b>1503,98</b>	2030,37
78	75	0,08	13,5	13,46	1,35	1,225	18,59	0,70	<b>1443,63</b>	1948,90
78	80	0,08	13,5	13,53	1,35	1,225	16,40	0,70	<b>1287,07</b>	1737,54

**Πίνακας 21: Η δύναμη της οπισθέλκουσας.**

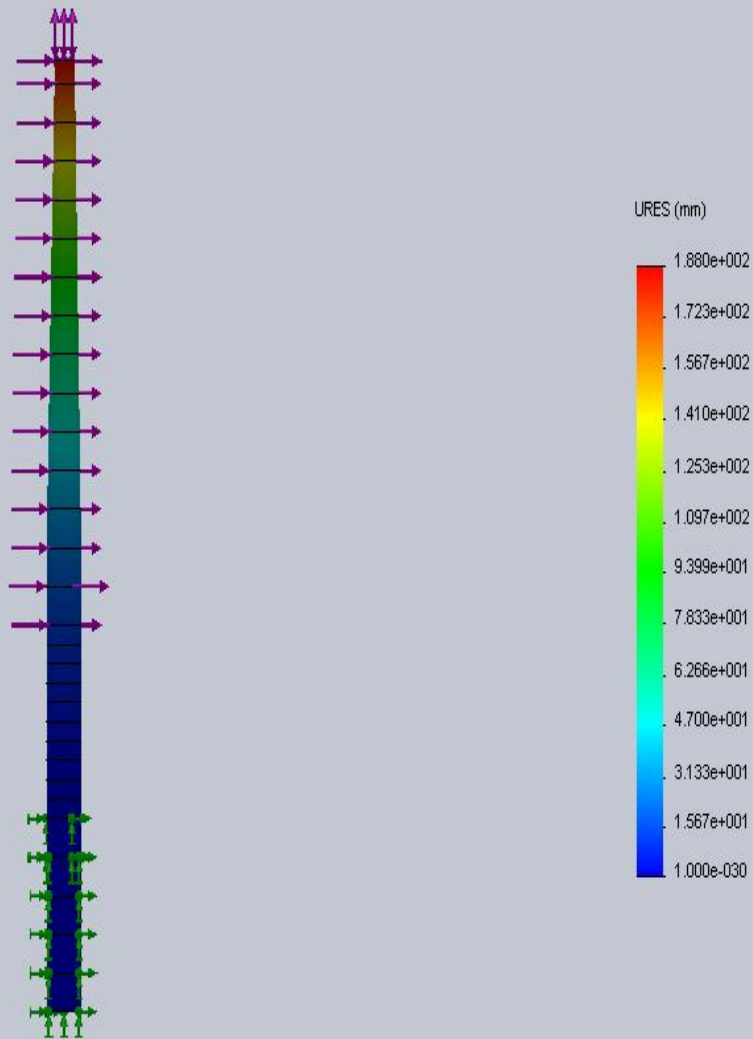
Τα υδροδυναμικά φορτία υπολογίστηκαν από το πρόγραμμα solidworks και ελήφθησαν υπόψιν απευθείας στον υπολογισμό.

**ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ:**



**Εικόνα 74: Εδώ φαίνεται η μέγιστη ισοδύναμη τάση κατά Von Mises.**

Model name: Assem2  
 Study name: Study 5  
 Plot type: Static displacement Displacement1  
 Deformation scale: 1



Εικόνα 75: Εδώ φαίνεται η μετατόπιση του πυλώνα.

A/A	ΕΛΑΧΙΣΤΗ	ΜΕΓΙΣΤΗ
Η ισοδύναμη τάση κατά Von Mises (N/m <sup>2</sup> )	4.13393E-011	5.91711E+007
Μετατόπιση (mm)	0	187,98

Πίνακας 22: Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων για περίπτωση φόρτισης 2.1

## **6η ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΦΟΡΤΙΣΗΣ 2.3 Η ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑ ΠΑΡΑΓΕΙ ΗΛΕΚΤΡΙΣΜΟ ΚΑΙ ΕΜΦΑΝΙΖΕΙ ΒΛΑΒΗ.**

Οι καιρικές συνθήκες που ελήφθησαν κατά τον υπολογισμό είναι

- Ταχύτητα ανέμου  $U_{\infty}=15,5$  m/s με ακραία ριπή ανέμου
- ύψος κύματος  $H_s=5,9$  m φυσιολογική κατάσταση της θάλασσας
- πυκνότητα αέρα  $\rho_{air}=1.225$ kg/m<sup>3</sup>
- συντελεστής ώσης  $C_T=0,24$
- επιφάνια που διαγράφουν τα φτερά  $A_f=12469$ m<sup>2</sup>
- Η ανεμογεννήτρια παράγει ηλεκτρισμό και παρουσιάζει βλάβη.
- Ο συντελεστής φορτίου είναι 1,1

Οι δυνάμεις που ασκούνται στο πυλώνα είναι :

ΒΑΡΟΣ ΝΑΣΕΛΛΑΣ ΚΑΙ ΤΟΥ ΡΟΤΟΡΑ (N)	ΔΥΝΑΜΗ ΩΣΗΣ T (N)	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ ΕΠΙ T (N)	P (W)	ΔQ (Nm)	ΡΟΠΗ ΑΠΟ ΤΟ ΒΑΡΟΣ ΤΗΣ ΝΑΣΕΛΛΑΣ (Nm)	ΡΟΠΗ ΑΠΟ ΤΟ ΒΑΡΟΣ ΤΟΥ ΡΟΤΟΡΑ (Nm)
3,43E+06	4,40E+05	4,84E+05	7,51E+06	5,91E+06	4,47E+06	5,39E+06

**Πίνακας 23 :Οι δυνάμεις που ασκούνται στη κορυφή του πυλώνα.**

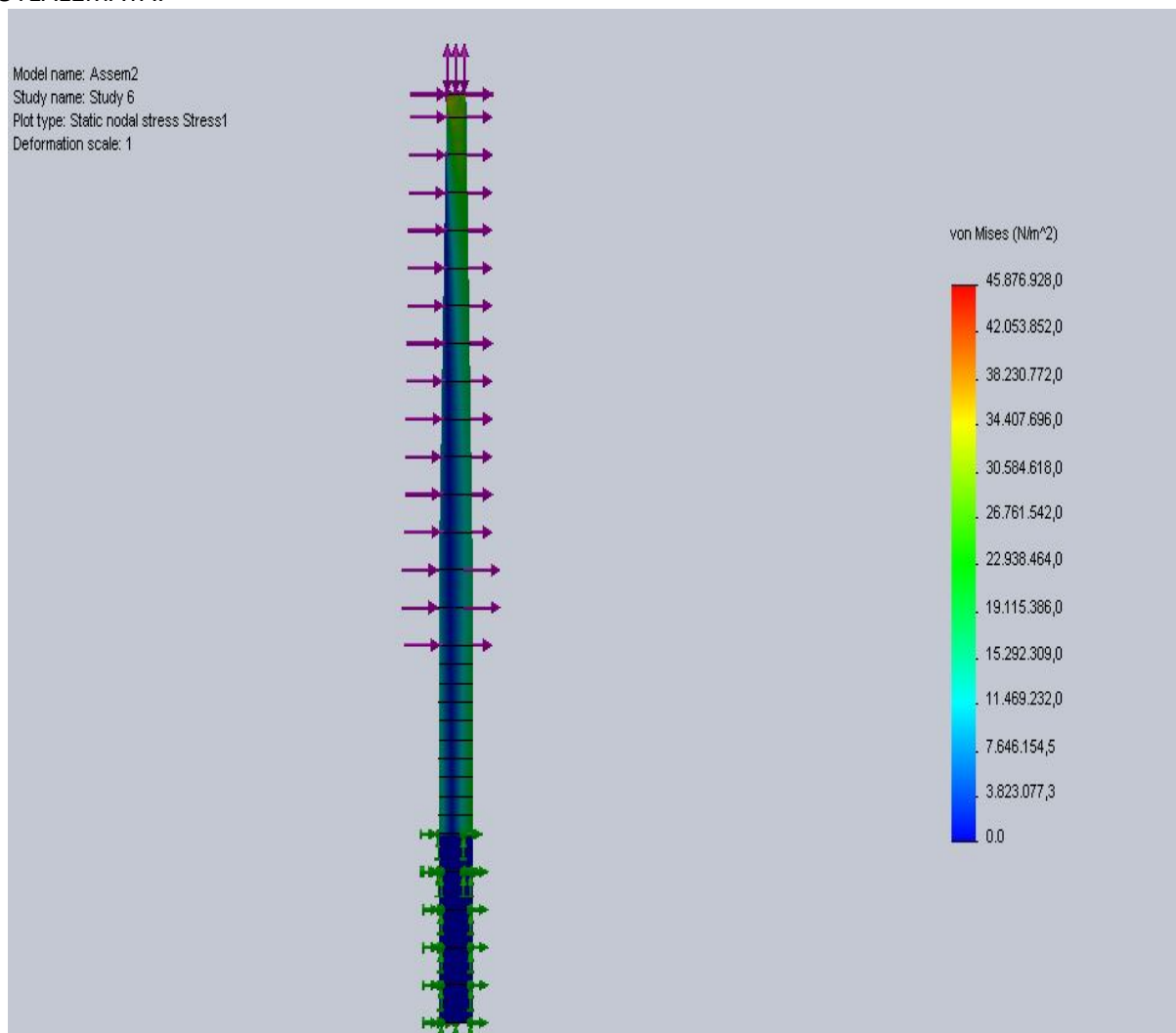
Η δύναμη της οπισθέλκουσας πάνω στο πυλώνα είναι στο παρακάτω πίνακα:

h2 (m)	h1 (m)	$\alpha$	Hh2 (m/s)	Uh1 (m/s)	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	A (m <sup>2</sup> )	$C_D$	D (N)	D ΕΠΙ ΤΟ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΦΟΡΤΙΟΥ (N)
78	5	0,08	15,5	12,44	1,1	1,225	30,80	0,70	<b>2044,18</b>	2248,59
78	10	0,08	15,5	13,15	1,1	1,225	30,80	0,70	<b>2283,93</b>	2512,32
78	15	0,08	15,5	13,58	1,1	1,225	30,80	0,70	<b>2437,01</b>	2680,71
78	20	0,08	15,5	13,90	1,1	1,225	29,50	0,70	<b>2444,43</b>	2688,88
78	25	0,08	15,5	14,15	1,1	1,225	28,51	0,70	<b>2448,11</b>	2692,92
78	30	0,08	15,5	14,36	1,1	1,225	27,52	0,70	<b>2432,88</b>	2676,17
78	35	0,08	15,5	14,54	1,1	1,225	26,53	0,70	<b>2403,74</b>	2644,12
78	40	0,08	15,5	14,69	1,1	1,225	25,54	0,70	<b>2363,81</b>	2600,19
78	45	0,08	15,5	14,83	1,1	1,225	24,54	0,70	<b>2315,18</b>	2546,70
78	50	0,08	15,5	14,96	1,1	1,225	23,55	0,70	<b>2259,36</b>	2485,30
78	55	0,08	15,5	15,07	1,1	1,225	22,56	0,70	<b>2197,45</b>	2417,20
78	60	0,08	15,5	15,18	1,1	1,225	21,57	0,70	<b>2130,10</b>	2343,11
78	65	0,08	15,5	15,28	1,1	1,225	20,58	0,70	<b>2058,49</b>	2264,34
78	70	0,08	15,5	15,37	1,1	1,225	19,58	0,70	<b>1982,61</b>	2180,87
78	75	0,08	15,5	15,45	1,1	1,225	18,59	0,70	<b>1903,06</b>	2093,37
78	80	0,08	15,5	15,53	1,1	1,225	16,40	0,70	<b>1696,67</b>	1866,34

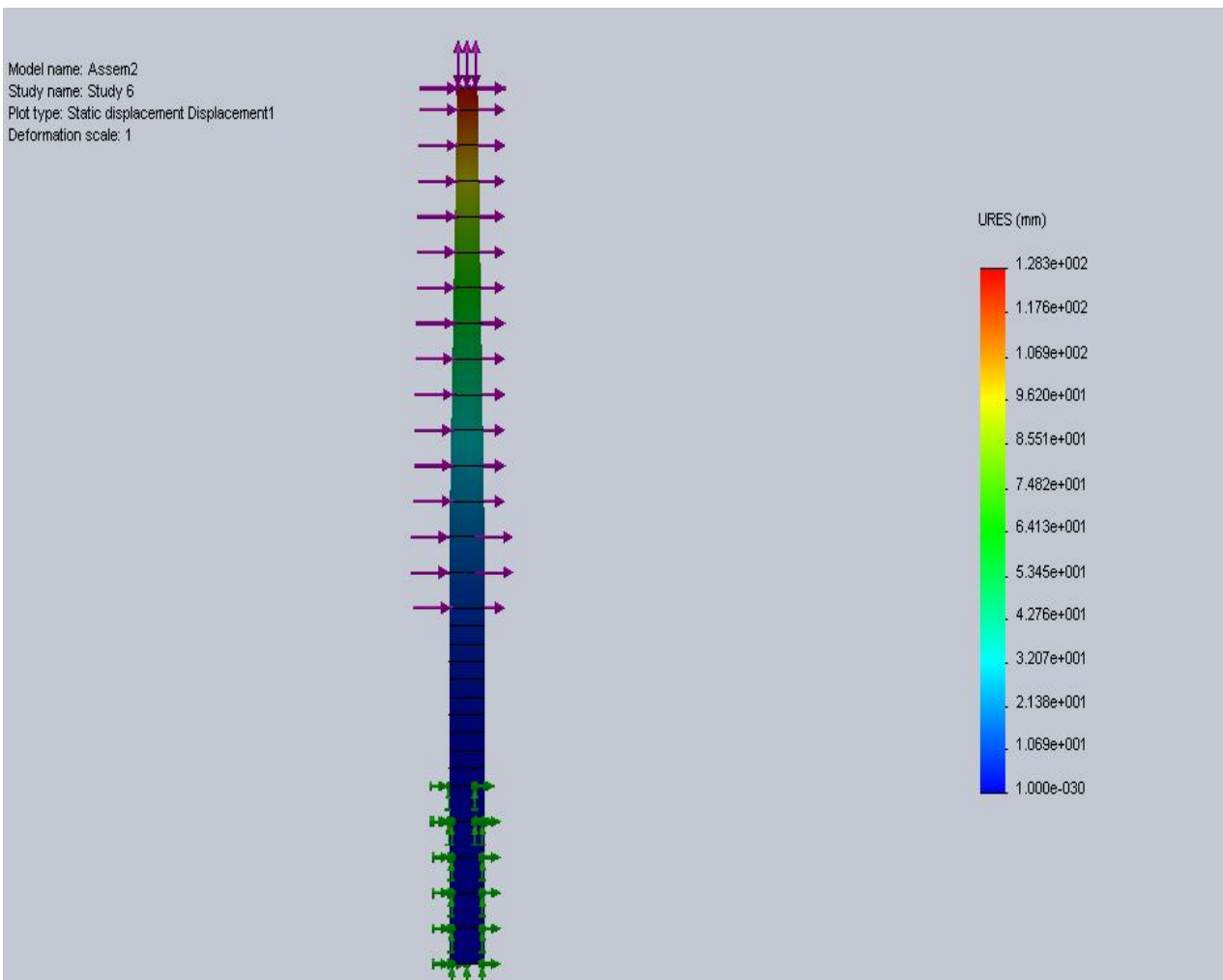
**Πίνακας 24: Η δύναμη της οπισθέλκουσας.**

Τα υδροδυναμικά φορτία υπολογίστηκαν από το πρόγραμμα solidworks και ελήφθησαν υπόψιν απευθείας στον υπολογισμό.

**ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ:**



**Εικόνα 76: Εδώ φαίνεται η μέγιστη ισοδύναμη τάση κατά Von Mises.**



Εικόνα 77: Εδώ φαίνεται η μετατόπιση του πυλώνα

A/A	ΕΛΑΧΙΣΤΗ	ΜΕΓΙΣΤΗ
Η ισοδύναμη τάση κατά Von Mises (N/m <sup>2</sup> )	2.42641E-012	4.58769E+007
Μετατόπιση (mm)	0	128,268

Πίνακας 25: Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων για περίπτωση φόρτισης 2.3

## 7η ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΦΟΡΤΙΣΗΣ 6.1 Η ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑ ΕΙΝΑΙ ΕΚΤΟΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

Οι καιρικές συνθήκες που ελήφθησαν κατά τον υπολογισμό είναι

- Ταχύτητα ανέμου  $U_{\infty}=47,5$  m/s με ακραία ριπή ανέμου
- ύψος κύματος  $H_s=15,04$  m ακραίες συνθήκες στη θάλασσα
- πυκνότητα αέρα  $\rho_{air}=1.225$ kg/m<sup>3</sup>
- συντελεστής ώσης  $C_T=0.01$
- επιφάνια που διαγράφουν τα φτερά  $A_r=12469$ m<sup>2</sup>
- Η ανεμογεννήτρια βρίσκεται σε κατάσταση ακινησίας και η νασέλα βρίσκεται υπό κλίση 8° .
- Ο συντελεστής φορτίου είναι 1,35

Οι δυνάμεις που ασκούνται στο πυλώνα είναι :

ΒΑΡΟΣ ΝΑΣΕΛΛΑΣ ΚΑΙ ΤΟΥ ΡΟΤΟΡΑ (N)	ΔΥΝΑΜΗ ΩΣΗΣ T (N)	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ ΕΠΙ T (N)	ΡΟΠΗ ΑΠΟ ΤΟ ΒΑΡΟΣ ΤΗΣ ΝΑΣΕΛΛΑΣ (Nm)	ΡΟΠΗ ΑΠΟ ΤΟ ΒΑΡΟΣ ΤΟΥ ΡΟΤΟΡΑ (Nm)	ΡΟΠΗ ΕΚΤΡΟΠΗΣ Y (Nm)
3,43E+06	1,70E+05	2,30E+05	4,47E+06	5,39E+06	3,64E+05

Πίνακας 26: Οι δυνάμεις που ασκούνται στη κορυφή του πυλώνα.

Η δύναμη της οπισθέλκουσας πάνω στο πυλώνα είναι στο παρακάτω πίνακα:

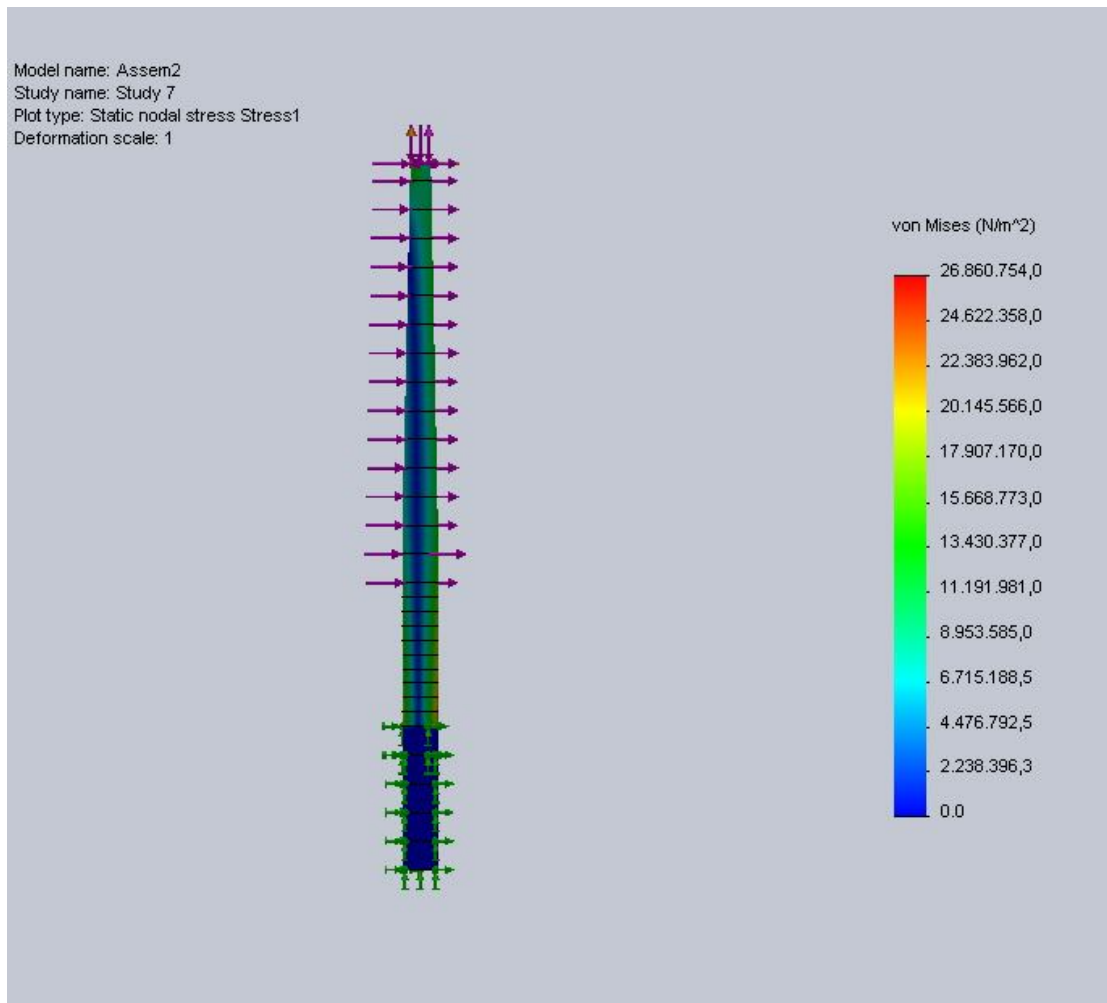
h2 (m)	h1 (m)	$\alpha$	Hh2 (m/s)	Uh1 (m/s)	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	A (m <sup>2</sup> )	$C_D$	D (N)	D ΕΠΙ ΤΟ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΦΟΡΤΙΟΥ (N)
78	5	0,08	47,5	38,13	1,35	1,225	30,80	0,70	<b>19197,39</b>	25916,47
78	10	0,08	47,5	40,30	1,35	1,225	30,80	0,70	<b>21448,99</b>	28956,14
78	15	0,08	47,5	41,63	1,35	1,225	30,80	0,70	<b>22886,61</b>	30896,93
78	20	0,08	47,5	42,60	1,35	1,225	29,50	0,70	<b>22956,30</b>	30991,01
78	25	0,08	47,5	43,37	1,35	1,225	28,51	0,70	<b>22990,81</b>	31037,60
78	30	0,08	47,5	44,00	1,35	1,225	27,52	0,70	<b>22847,78</b>	30844,51
78	35	0,08	47,5	44,55	1,35	1,225	26,53	0,70	<b>22574,16</b>	30475,12
78	40	0,08	47,5	45,03	1,35	1,225	25,54	0,70	<b>22199,16</b>	29968,87
78	45	0,08	47,5	45,46	1,35	1,225	24,54	0,70	<b>21742,47</b>	29352,34
78	50	0,08	47,5	45,84	1,35	1,225	23,55	0,70	<b>21218,27</b>	28644,67
78	55	0,08	47,5	46,19	1,35	1,225	22,56	0,70	<b>20636,86</b>	27859,77
78	60	0,08	47,5	46,51	1,35	1,225	21,57	0,70	<b>20004,33</b>	27005,84
78	65	0,08	47,5	46,81	1,35	1,225	20,58	0,70	<b>19331,82</b>	26097,96
78	70	0,08	47,5	47,09	1,35	1,225	19,58	0,70	<b>18619,20</b>	25135,92
78	75	0,08	47,5	47,35	1,35	1,225	18,59	0,70	<b>17872,13</b>	24127,38
78	80	0,08	47,5	47,60	1,35	1,225	16,40	0,70	<b>15933,87</b>	21510,73

Πίνακας 27: Η δύναμη της οπισθέλκουσας.



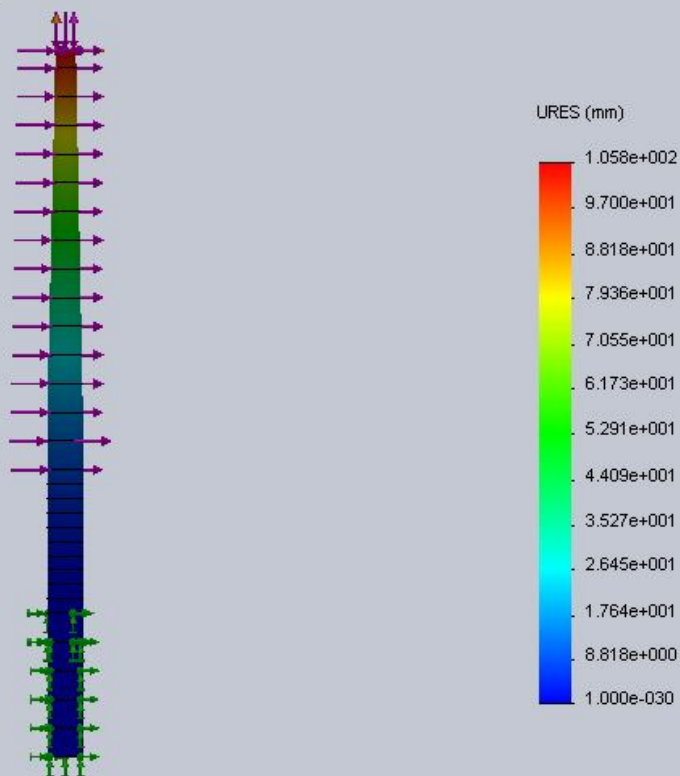
Τα υδροδυναμικά φορτία υπολογίστηκαν από το πρόγραμμα solidworks και ελήφθησαν υπόψιν απευθείας στον υπολογισμό.

**ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ:**



**Εικόνα 78:** Εδώ φαίνεται η μέγιστη ισοδύναμη τάση κατά Von Mises.

Model name: Assem2  
 Study name: Study 7  
 Plot type: Static displacement Displacement1  
 Deformation scale: 1



Εικόνα 79: Εδώ φαίνεται η μετατόπιση του πυλώνα.

A/A	ΕΛΑΧΙΣΤΗ	ΜΕΓΙΣΤΗ
Η ισοδύναμη τάση κατά Von Mises (N/m <sup>2</sup> )	5.56782E-013	2.68608E+007
Μετατόπιση (mm)	0	105.819

Πίνακας 28: Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων για περίπτωση φόρτισης 6.1

## 8η ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΦΟΡΤΙΣΗΣ 7.1 Η ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑ ΕΙΝΑΙ ΕΚΤΟΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΚΑΙ ΠΑΡΟΥΣΙΑΖΕΤΑΙ ΒΛΑΒΗ.

Οι καιρικές συνθήκες που ελήφθησαν κατά τον υπολογισμό είναι:

- Ταχύτητα ανέμου  $U_{\infty}=38$  m/s με ακραία ριπή ανέμου
- ύψος κύματος  $H_s=15,04$  m ακραίες συνθήκες στη θάλασσα
- πυκνότητα αέρα  $\rho_{air}=1.225$ kg/m<sup>3</sup>
- συντελεστής ώσης  $C_T=0.01$
- επιφάνια που διαγράφουν τα φτερά  $A_r=12469$ m<sup>2</sup>
- Η ανεμογεννήτρια βρίσκεται σε κατάσταση ακινησίας και παρουσιάζει βλάβη και η νασέλα βρίσκεται υπό κλίση 8° .
- Ο συντελεστής φορτίου είναι 1,1.

Οι δυνάμεις που ασκούνται στο πυλώνα είναι :

ΒΑΡΟΣ ΝΑΣΕΛΛΑΣ ΚΑΙ ΤΟΥ ΡΟΤΟΡΑ (N)	ΔΥΝΑΜΗ ΩΣΗΣ T (N)	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ ΕΠΙ T (N)	ΡΟΠΗ ΑΠΟ ΤΟ ΒΑΡΟΣ ΤΗΣ ΝΑΣΕΛΛΑΣ (Nm)	ΡΟΠΗ ΑΠΟ ΤΟ ΒΑΡΟΣ ΤΟΥ ΡΟΤΟΡΑ (Nm)	ΡΟΠΗ ΕΚΤΡΟΠΗΣ Y (Nm)
3,43E+06	1,09E+05	1,20E+05	4,47E+06	5,39E+06	1,90E+05

Πίνακας 29: Οι δυνάμεις που ασκούνται στη κορυφή του πυλώνα.

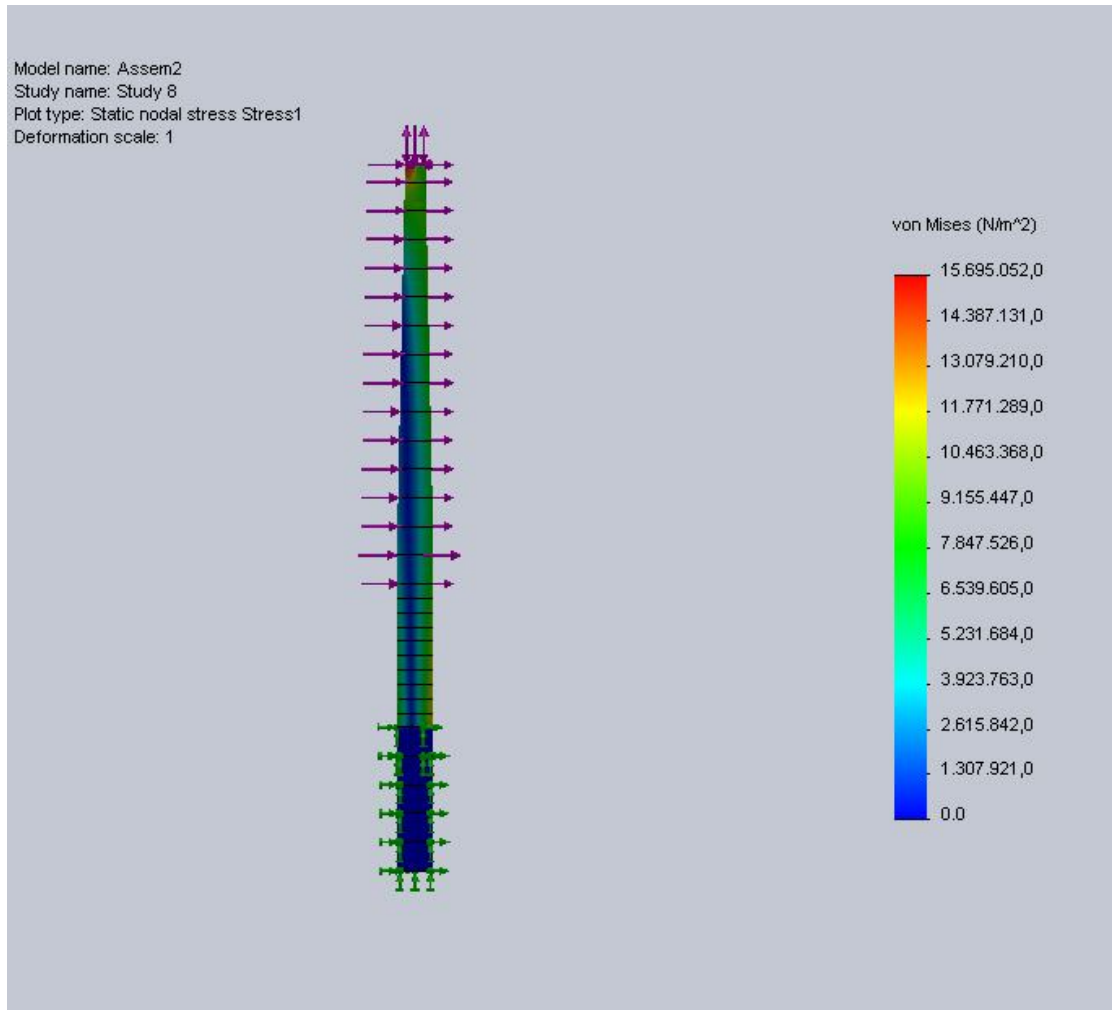
Η δύναμη της οπισθέλκουσας πάνω στο πυλώνα είναι στο παρακάτω πίνακα:

h2 (m)	h1 (m)	$\alpha$	Hh2 (m/s)	Uh1 (m/s)	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	A (m <sup>2</sup> )	$C_D$	D (N)	D ΕΠΙ ΤΟ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΦΟΡΤΙΟΥ (N)
78	5	0,08	38	30,50	1,1	1,225	30,80	0,70	<b>12286,33</b>	13514,96
78	10	0,08	38	32,24	1,1	1,225	30,80	0,70	<b>13727,36</b>	15100,09
78	15	0,08	38	33,30	1,1	1,225	30,80	0,70	<b>14647,43</b>	16112,18
78	20	0,08	38	34,08	1,1	1,225	29,50	0,70	<b>14692,03</b>	16161,24
78	25	0,08	38	34,69	1,1	1,225	28,51	0,70	<b>14714,12</b>	16185,53
78	30	0,08	38	35,20	1,1	1,225	27,52	0,70	<b>14622,58</b>	16084,84
78	35	0,08	38	35,64	1,1	1,225	26,53	0,70	<b>14447,46</b>	15892,21
78	40	0,08	38	36,02	1,1	1,225	25,54	0,70	<b>14207,46</b>	15628,21
78	45	0,08	38	36,36	1,1	1,225	24,54	0,70	<b>13915,18</b>	15306,70
78	50	0,08	38	36,67	1,1	1,225	23,55	0,70	<b>13579,69</b>	14937,66
78	55	0,08	38	36,95	1,1	1,225	22,56	0,70	<b>13207,59</b>	14528,35
78	60	0,08	38	37,21	1,1	1,225	21,57	0,70	<b>12802,77</b>	14083,05
78	65	0,08	38	37,45	1,1	1,225	20,58	0,70	<b>12372,37</b>	13609,60
78	70	0,08	38	37,67	1,1	1,225	19,58	0,70	<b>11916,29</b>	13107,91
78	75	0,08	38	37,88	1,1	1,225	18,59	0,70	<b>11438,17</b>	12581,98
78	80	0,08	38	38,08	1,1	1,225	16,40	0,70	<b>10197,68</b>	11217,44

Πίνακας 30: Η δύναμη της οπισθέλκουσας.

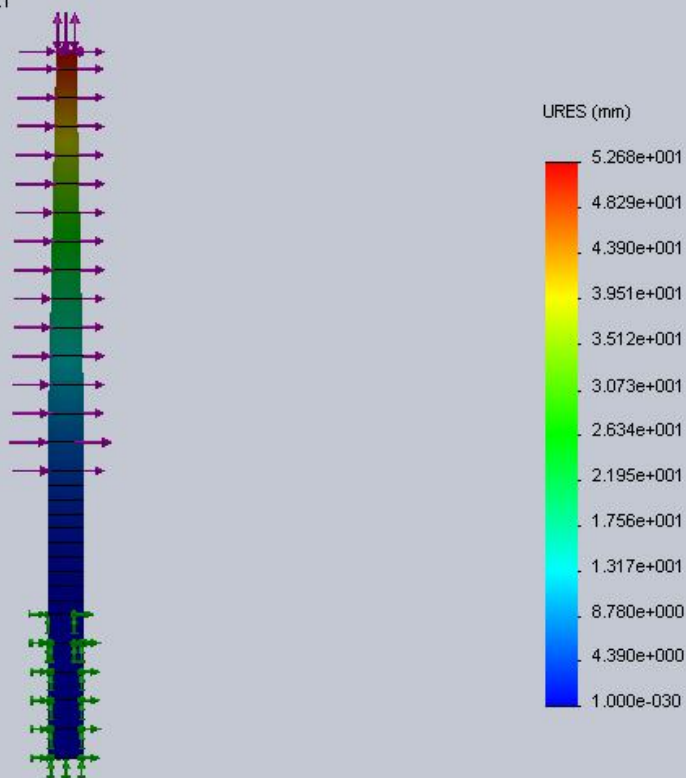
Τα υδροδυναμικά φορτία υπολογίστηκαν από το πρόγραμμα solidworks και ελήφθησαν υπόψιν απευθείας στον υπολογισμό.

**ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ:**



**Εικόνα 80: Εδώ φαίνεται η μέγιστη ισοδύναμη τάση κατά Von Mises.**

Model name: Assem2  
 Study name: Study 8  
 Plot type: Static displacement Displacement1  
 Deformation scale: 1



Εικόνα 81: Εδώ φαίνεται η μετατόπιση του πυλώνα.

A/A	ΕΛΑΧΙΣΤΗ	ΜΕΓΙΣΤΗ
Η ισοδύναμη τάση κατά Von Mises (N/m <sup>2</sup> )	5.25458E-018	1.56951E+007
Μετατόπιση (mm)	0	52.6816

Πίνακας 31: Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων για περίπτωση φόρτισης 7.1

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9: Συμπεράσματα**

Για τη μεταφορά και την εγκατάστασή τους η καλύτερη μέθοδος είναι η BE1T διότι καταναλώνει λιγότερο χρόνο για κάθε παράκτια εγκατάσταση με αποτέλεσμα να έχουμε λιγότερα έξοδα και ποιο γρήγορα τη κατασκευεί του παράκτιου αιολικού πάρκου.

Στο κεφάλαιο 8 έγινε η ανάλυση φορτίων στο πρόγραμμα solidworks μίας παράκτιας ανεμογεννήτριας με τύπο θεμελίωσης μονού πυλώνα η οποία είναι τοποθετημένη στη θάλασσα με βάθος νερού 20 m και ύψος πυλώνα 78 m πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας. Στο πρόγραμμα σχεδιάστηκε ο πυλώνας της ανεμογεννήτριας με τη βάση του σε πραγματικές διαστάσεις και του εφαρμόστηκαν τα φορτία που δημιουργούνται σύμφωνα με τις περιπτώσεις φορτίσεων που δίνονται από τον πίνακα 6 και τα χαρακτηριστικά της ανεμογεννήτριας της Repower των 5 MW. Οι περιπτώσεις φορτίσεων που ελέγχθηκαν είναι: 1.1, 1.4, 1.5, 1.6, 2.1, 2.3, 6.1, 7.1. από τις οποίες βγήκαν τα παρακάτω αποτελέσματα που είναι στο πίνακα 32.

A/A	Περίπτωση φόρτισης	Ταχύτητα ανέμου U (m/s)	Χαρακτηριστικά ανέμου	Τάση κατά Von Misses MPa (MN/m <sup>2</sup> ) (Μέγιστη)	Μετατόπιση (mm) (Μέγιστη)
1	1.1	13,5	φυσιολογική τύρβη	64,27	208,633
2	1.4	15,5	Ριπή ανέμου και μεταβολή διεύθυνσης	53,98	158,593
3	1.5	13,5	ακραία διάτμηση ανέμου	59,12	187,984
4	1.6	25	φυσιολογική τύρβη	61,38	151,532
5	2.1	13,5	Φυσιολογική, τύρβη	59,17	187,98
6	2.3	15,5	Ριπή ανέμου	45,87	128,268
7	6.1	47,5	ακραία ταχύτητα ανέμου	26,86	105,819
8	7.1	38	ακραία ταχύτητα ανέμου	15,69	52,6816

**Πίνακας 32: Αποτελέσματα φορτίσεων.**

Όπως φαίνεται στο πίνακα η μέγιστη ισοδύναμη τάση κατά Von Mises είναι στη περίπτωση φόρτισης 1.1 με μέγιστη τάση 64,27 MPa και μέγιστη μετατόπιση 208,633 mm και η ελάχιστη στην 7.1 με μέγιστη τάση 15,69 MPa και μέγιστη μετατόπιση 52,6816 mm .

Σε κάθε περίπτωση η μέγιστη ισοδύναμη τάση κατά Von Mises είναι μικρότερη από την επιτρεπόμενη τάση που είναι 277 MPa για το υλικό όπου και χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή του μοντέλου το οποίο είναι S355 . Συνεπώς ο συντελεστής ασφαλείας ενός τέτοιου πυλώνα είναι μεγαλύτερος από την μέγιστη ισοδύναμη τάση κατά Von Mises που αναπτύσσεται στο μοντέλο. Επίσης η μετατόπιση του πυλώνα είναι μικρότερη από το 1 % του ύψους του πυλώνα άρα η λειτουργία της ανεμογεννήτριας είναι ασφαλής

Επιβεβαιώνεται λοιπόν η ορθότητα της διαστασιολόγησης του πυλώνα .

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. [ ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Ο ΠΥΛΩΝΑΣ ΤΗΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ, 2012]Fahad jamil, Saad bin zia, Parvez ali abbasi, Moiz ansari ,To Study of Wind Resistant Stabilityof Tubular Wind Turbine Tower  
([http://www.academia.edu/2339055/stability\\_of\\_tubular\\_wind\\_turbine\\_tower](http://www.academia.edu/2339055/stability_of_tubular_wind_turbine_tower) )
2. [ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Ο ΠΥΛΩΝΑΣ ΤΗΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ ]Βέλτιστος Δομικός Σχεδιασμός Ανεμογεννητριών  
([http://dSPACE.lib.ntua.gr/bitstream/123456789/8161/3/birdasm\\_wind.pdf](http://dSPACE.lib.ntua.gr/bitstream/123456789/8161/3/birdasm_wind.pdf) )
3. [ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΤΥΠΟΙ ΠΑΡΑΚΤΙΩΝ ΘΕΜΕΛΙΩΣΕΩΝ, 2010] Τεχνολογία Θεμελιώσεων των Παράκτιων Αιολικών Συστημάτων  
(<http://nefeli.lib.teicrete.gr/browse/stef/mhx/2013/TzanetakisEleftherios/attached-document-1387271047-428506-22713/TzanetakisEleftherios2013.pdf>)
4. [ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΠΥΛΩΝΑ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ, 2011] How Offshore Wind Turbine Towers are Welded  
(<http://www.lorc.dk/offshore-wind-energy/towers/tower-welding>)
5. [ ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΚΑΙ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ, 2011]Offshore Wind Turbine Installation Analyses  
(<https://www.yumpu.com/en/document/view/10277494/offshore-wind-turbine-installation-analyses>)
6. [ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΩΚΕΑΝΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΚΑΙ ΑΙΟΛΙΚΟ ΔΥΝΑΜΙΚΟ ] Υπεράκτιες Ανεμογεννήτριες Ζήτημα Διασύνδεσης τους στο Δίκτυο  
( <http://viviothmmy.ee.auth.gr/813/1/diploma.pdf> )
7. [ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΦΟΡΤΙΑ ΠΟΥ ΕΝΕΡΓΟΥΝ ΣΤΗΝ ΠΑΡΑΚΤΙΑ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑ, 2011]Wei Gong, Lattice Tower Desing of Offshore Wind Turbine Support Structures  
([https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0CC8QFjAA&url=http%3A%2F%2Frepository.tudelft.nl%2Fassets%2Fuid%3A60cbccec-d00f-4814-933f-d20c3bb3c4fc%2FWei\\_Gong\\_Lattice\\_Tower\\_Design\\_of\\_Offshore\\_Wind\\_Turbine\\_Support\\_Structures\\_v0.pdf&ei=sIszUrDjDcfcsgblvYCQAQ&usq=AFQjCNFMULR73XTVC8Yf4w5Nqsktal\\_3KQ&sig2=PhymDPja-asmmbi39KI7IQ&bvm=bv.52164340,d.Yms&cad=rja](https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0CC8QFjAA&url=http%3A%2F%2Frepository.tudelft.nl%2Fassets%2Fuid%3A60cbccec-d00f-4814-933f-d20c3bb3c4fc%2FWei_Gong_Lattice_Tower_Design_of_Offshore_Wind_Turbine_Support_Structures_v0.pdf&ei=sIszUrDjDcfcsgblvYCQAQ&usq=AFQjCNFMULR73XTVC8Yf4w5Nqsktal_3KQ&sig2=PhymDPja-asmmbi39KI7IQ&bvm=bv.52164340,d.Yms&cad=rja))
8. [
9. 6.3. Η δύναμη της οπισθέλκουσας]Αθανάσιος Α. Αργυρίου, Μηχανική των ρευστών  
([https://mail-attachment.googleusercontent.com/attachment/u/0/?ui=2&ik=51da227c9c&view=att&th=142f0c373f4aba45&attid=0.1&disp=inline&realattid=f\\_hp6q9hu41&safe=1&zw&saduie=AG9B\\_P9zOHZyLwtrWaugWtMbLo8&sadet=1391109767493&sads=n58sDut5kugcUE1RZ7qowjXeUCw](https://mail-attachment.googleusercontent.com/attachment/u/0/?ui=2&ik=51da227c9c&view=att&th=142f0c373f4aba45&attid=0.1&disp=inline&realattid=f_hp6q9hu41&safe=1&zw&saduie=AG9B_P9zOHZyLwtrWaugWtMbLo8&sadet=1391109767493&sads=n58sDut5kugcUE1RZ7qowjXeUCw) )
10. [7.1. Εισαγωγή, 2007]Thomas Krogh, HAWC Load Simulation of Generic 5MW Offshore Wind Turbine Model  
(<http://www.risoe.dk/rispubl/reports/ris-r-1475.pdf> & <http://www.risoe.dk/vea/recoff/> )
11. [8.1. Περιπτώσεις φόρτισης (Load cases), 2007] J.M. Jonkman and M.L. Buih,Jr. Loads Analysis of a Floating Offshore Wind Turbine Using Fully Coupled Simulation  
(<http://www.nrel.gov/wind/pdfs/41714.pdf> )



12. [Εικόνα 43. Καμπύλη ισχύος της Repower των 5 MW. [12]2006]Operational Results of Worlds Largest Wind Energy Converter REpower 5M and Project Status of the First Offshore Wind Farm using 5 MW Turbines (<http://192.107.92.31/test/owemes/17.pdf>)
13. [Εικόνα 42: Repower 5 MW [13]]Repower 5MW ([http://www.senvion.com/fileadmin/download/produkte/RE\\_PP\\_5M\\_uk.pdf?fromold=1](http://www.senvion.com/fileadmin/download/produkte/RE_PP_5M_uk.pdf?fromold=1))